

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA

LUIS AUGUSTO MAIA BRAGGIO

VANTAGEM COMPETITIVA NA
MANUFATURA ATRAVÉS DA APLICAÇÃO
DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DE
EVENTOS DISCRETOS

Campinas, 2011

Luis Augusto Maia Braggio

VANTAGEM COMPETITIVA NA MANUFATURA ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DE EVENTOS DISCRETOS

Dissertação apresentada ao Curso de
Mestrado da Faculdade de Engenharia
Mecânica da Universidade Estadual de
Campinas, como requisito para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia
Automobilística

Área de concentração: Manufatura

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

Campinas

2011

B73v Braggio, Luis Augusto Maia
Vantagem competitiva na manutenção através da aplicação da ferramenta de simulação de eventos discretos / Luis Augusto Maia Braggio. --Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Gilberto Francisco Martha de Souza.
Dissertação de Mestrado (Profissional) -
Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Negócio - Simulação por computador. 2. Sistema de tempo discreto. I. Souza, Gilberto Francisco Martha de. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Competitive advantage in manufacturing through the discrete-event simulation application

Palavras-chave em Inglês: Business - Computer simulations, Discrete - Time systems

Área de concentração: Manufatura

Titulação: Mestre em Engenharia Automobilística

Banca examinadora: Amauri Hassui, João Paulo Pereira Marciano

Data da defesa: 19-07-2011

Programa de Pós Graduação: Engenharia Mecânica

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONAL

**VANTAGEM COMPETITIVA NA
MANUFATURA ATRAVÉS DA APLICAÇÃO
DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO DE
EVENTOS DISCRETOS**

Autor: Luis Augusto Maia Braggio

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza
Universidade de São Paulo - Escola Politécnica



Prof. Dr. Amauri Hassui
Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica



Prof. Dr. João Paulo Pereira Marcicano
Universidade de São Paulo - Leste / Escola de Artes, Ciências e Humanidades

Campinas, 19 de Julho de 2011

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meu pai Sergio Luiz Braggio (*in memoriam*).

Dedico a minha querida mãe Marta Maia Braggio, grande incentivadora para o meu crescimento pessoal e profissional em todos os momentos da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser realizado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

À minha mãe e minhas irmãs, Marta Helena Maia Braggio e Maria Fernanda Maia Braggio pelo o apoio e incentivo em todos os momentos da minha vida.

À minha namorada, Fabiana Técuro de Paula, pela paciência e compreensão nos momentos que me ausentei.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilberto Francisco Martha de Souza, por ter acreditado no meu potencial e aceitado me orientar, mostrando os caminhos a serem seguidos.

Ao corpo docente do curso, em especial ao Prof. Dr. Jefferson Oliveira Gomes por incentivar os estudos de manufatura digital.

À MWM International Motores, que proporcionou a realização desse curso de Mestrado e permitiu conciliar as atividades acadêmicas e profissionais.

À todos os meus familiares, amigos e colegas da MWM, em especial a Bruno Rubega Pimentel, José Salis, Clodoaldo Aguado, Marco Aurélio Daló, Marcelo Maciel Rabelo, Marcos Hengler da Cruz, Edvaldo Batista Rezende e Fernando Cardoso Borges, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão desse trabalho.

“A mente que se abre a uma nova idéia jamais
voltará ao seu tamanho original.”

Albert Einstein

Resumo

Esse trabalho busca, através da administração estratégica da manufatura, estabelecer as prioridades competitivas e, utilizando a ferramenta de simulação de evento discreto, implementá-las. A simulação é uma ferramenta poderosa, pois se executa experimentos virtualmente, diminuindo os riscos de implementação de soluções pouco testadas e alcançando, na maioria das vezes, a melhor solução, além da possibilidade inerente de avaliar sistemas complexos e considerar seu comportamento dinâmico. Apesar das vantagens da ferramenta de simulação, na manufatura a mesma ainda não é uma ferramenta comumente estabelecida no mercado. Nesse trabalho, além da simulação abordam-se também os requisitos e as restrições de um projeto em simulação de evento discreto. Foi elaborado um estudo de caso em uma empresa fabricante de motores diesel, onde foi realizado um mapeamento da manufatura identificando a estratégia de negócio e a prioridade competitiva, caracterizando-se respectivamente por diferenciação e flexibilidade, para cumprir à necessidade do aumento de capacidade das linhas de usinagem. Definiu-se então uma linha de usinagem para aplicar a ferramenta de simulação. Dentro do modelo de simulação, verificou-se a influência das variáveis de troca de ferramenta e quebra de máquina na capacidade de produção da linha. O *software* utilizado para a construção do modelo de simulação foi o *Automod* e a execução dos experimentos foi realizada no *software AutStat*. Os resultados obtidos demonstraram que houve um aumento da capacidade de produção, apenas quando alterado as variáveis de quebra de máquina das operações determinadas como críticas. Atingindo o ganho de 5% necessário para atender o volume de produção previsto. Como o modelo de simulação está validado e nesse trabalho não foram esgotadas todas as alternativas de melhoria, ainda é possível realizar outros experimentos para obtenção dos resultados ainda melhores. A ferramenta de simulação de evento discreto mostrou-se eficiente ao realizar experimentos sem o comprometimento dos recursos alocados na linha. Também se observou que para obter um resultado satisfatório deve-se possuir na empresa uma estrutura para execução do projeto sem deixar o processo de desenvolvimento moroso.

Palavras chaves: Vantagem Competitiva, Estratégia de Negócio e Simulação Evento Discreto

Abstract

This thesis aims through the manufacturing strategic management to establish the competitive priorities and using discrete event simulation tool to implement them. The simulation is a powerful tool because it executes experiments virtually, reducing implementation risks and achieving, in most cases, the best solution, besides the inherent possibility to evaluate complex systems and consider their dynamic behavior. Despite of these advantages, the manufacturing simulation is not a usual tool in the market, therefore in this work, the discrete event simulation requirements and constraints were analyzed. A case study was elaborated in a diesel engine manufacturer company, wherein was done a manufacturing mapping to identify the business strategy and competitive priorities, characterized respectively by differentiation and flexibility, to perform the increased capacity of machining lines. Then, it was defined a machining line to apply the simulation tool. The simulation model has been designed to check the influence of machining tools change and downtime machine variables in line production capacity. The software used to build the simulation model was Automod and experiments execution was done by AutoStat software. The results showed an increase in production capacity, only, when the downtime machine variables of critical operations were changed. Achieving gain 5% needed to attend the foreseen production volume. As the simulation model is validated and not all improvement alternatives were exhausted, it is still possible to realize other experiments to obtain even better results. The discrete-event simulation tool presented to be efficient when performing experiments without compromising the resources allocated at the line. Then, it was noted that to obtain a satisfactory result, the company should have a structure to execute the simulation project without a lengthy development process.

Key words: Competitive Advantage, Business Strategy and Discrete-Event Simulation

Lista de Figuras

Figura 1: Metodologia de Simulação (CHWIF, et al., 2006)	5
Figura 2: Etapas de um Projeto de Simulação de Eventos Discretos	6
Figura 3: Fluxo de trabalho adaptado de BANKS, et al. (2001)	8
Figura 4: Divisão das estratégias empresariais adaptado de Wheelwright (1984)	14
Figura 5: Ligação natural entre as estratégias competitivas e as prioridades competitivas da manufatura (adaptado PIRES, 1995)	16
Figura 6: Interpretação Gráfica de uma Simulação Contínua (CHWIF, 1999)	19
Figura 7: Interpretação Gráfica de uma Simulação de Evento Discreto (CHWIF, 1999)	20
Figura 8: A representação gráfica de um sistema (GEORGES, 2005)	21
Figura 9: Representação do Sistema por um Modelo adaptado (GEORGES, 2005)	23
Figura 10: Áreas de aplicação da ferramenta de simulação na manufatura (GOMES, 2009)	30
Figura 11: Evolução do custo de um sistema em suas diferentes fases (HARREL, et al., 2000).	31
Figura 12: Comparativo da evolução dos custos com e sem aplicação da simulação (HARREL, et al., 2000)	32
Figura 13: Organograma de uma equipe de simulação (GEORGES, 2005).	35
Figura 14: Sistema de Manufatura (Agostinho, 1995 apud GEORGES, 2001)	36
Figura 15: Estrutura básica de um modelo de Fila (GEORGES, 2005).	38
Figura 16: Armadilhas da Simulação (fonte: ULGEN et al(1996) apud COLMANETTI, 2001).	47
Figura 17: Gráfico de capacidade das linhas em relação ao volume de produção 2011	50
Figura 18: Modelo conceitual da linha de usinagem A	54
Figura 19: Gráfico de parada das máquinas 172	56
Figura 20: Gráfico de parada das máquinas 447	57
Figura 21: Fluxograma de processo	59
Figura 22: Layout da linha de usinagem A e fluxo da peça	60
Figura 23: Representação dos elementos do OEE (LUCERO, 2006)	61
Figura 24: Tela do SAP do MTTR e MTBF da máquina 683	65
Figura 25: Histograma do Tempo de Troca de Ferramenta da Máquina 172	67

Figura 26: Teste de aderência (KS / AD / χ^2) máquina 172	68
Figura 27: Comparação das distribuições estatísticas com histograma do Tempo de Troca de Ferramenta na máquina 172	68
Figura 28: Comparação das distribuições estatísticas através do gráfico PPN - Máquina 172.....	69
Figura 29: Comparação das distribuições estatísticas através Box Plot - Máquina 172	69
Figura 30: Comparação das distribuições estatísticas através do gráfico de diferença das curvas estatísticas máquina 172	69
Figura 31: Representação da distribuição estatísticas na linguagem <i>Automod</i> máquina 172	70
Figura 32: Histograma do Tempo de Troca de Ferramenta Máquina 447	71
Figura 33: Teste de aderência (KS / AD / χ^2) - Máquina 447	72
Figura 34: Comparação das distribuições estatísticas com histograma - Máquina 447	72
Figura 35: Comparação das distribuições estatísticas através do gráfico PPN - Máquina 447.....	73
Figura 36: Comparação das distribuições estatísticas através Box Plot- Máquina 447	73
Figura 37: Comparação das distribuições estatísticas através do gráfico de diferença das curvas estatísticas máquina 447	73
Figura 38: Representação da distribuição estatísticas na linguagem <i>Automod</i> - Máquina 447.....	74
Figura 39: Layout da linha de usinagem A no software de simulação.....	75
Figura 40: Exemplo de programação no <i>Automod</i>	76
Figura 41: Estudo estatístico da produção diária para períodos de 30, 60, 90, 120, 150,180 e 363	77
Figura 42: Resultado da simulação para validação do modelo	78
Figura 43: Tela de acompanhamento no debugger do Automod.....	79
Figura 44: Parametrização das condições de simulação no software AutoStat.....	81
Figura 45: Tela de criação de análises no software AutoStat.....	81
Figura 46: Tela de criação das respostas no software AutoStat	82
Figura 47: Gráfico de produção para determinar o warm-up	83
Figura 48: Resultado da simulação modelo atual no software <i>AutoStat</i>	84
Figura 49: Resultado da simulação da variação de vida útil de todas as ferramentas ao mesmo tempo	89

Figura 50: Resultado da simulação da variação de vida útil de todas as ferramentas ao mesmo tempo	94
Figura 51: Tempo de vida dos equipamentos da linha de usinagem A.	96

Lista de Tabelas

Tabela 1: Exemplo de Sistemas e seus Componentes adaptado (BANKS, et al., 2001).....	22
Tabela 2: Resumo dos métodos revisados para avaliação e seleção de softwares de simulação de evento discretos (SILVA, 2006).....	46
Tabela 3: Matriz de decisão da linha de usinagem para aplicação da ferramenta de simulação ...	51
Tabela 4: Tempo disponível por dia	61
Tabela 5: Tipo de aplicação de peça.....	62
Tabela 6: Tempo de ciclo por aplicação	62
Tabela 7: Número de operadores por máquina.....	63
Tabela 8: Tabela de dados MTBF e MTTR	65
Tabela 9: Vida Útil de ferramenta em peças produzidas.....	66
Tabela 10: Tempo de troca de ferramenta máquina 437 em minutos	66
Tabela 11: Estatística descritiva da máquina 172.....	67
Tabela 12: Rank das distribuições estatísticas para troca de ferramenta na máquina 172	68
Tabela 13: Estatística descritiva do Tempo de Troca de Ferramenta da máquina 447	71
Tabela 14: Rank das distribuições estatísticas para troca da ferramenta da máquina 447	72
Tabela 15: Resultado da simulação para V&V	78
Tabela 16: Cenários da influência da variação de vida útil de ferramenta na produtividade.....	84
Tabela 17: Resultado da simulação para variação da vida útil da ferramenta da máquina 172	85
Tabela 18: Resultado da simulação para variação da vida útil da ferramenta da máquina 447	86
Tabela 19: Resultado da simulação para variação da vida útil da ferramenta da máquina 437	87
Tabela 20: Resultado da simulação para variação de todas as vidas úteis de ferramenta ao mesmo tempo	88
Tabela 21: Cenários da influência da variação do MTBF/MTTR na produtividade.....	89
Tabela 22: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 435	90
Tabela 23: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 437	90
Tabela 24: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 172	91
Tabela 25: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 447	91
Tabela 26: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 581	92

Tabela 27: Resultado da simulação para variação de todas as vidas úteis de ferramenta ao mesmo tempo	93
Tabela 28: Resultado da simulação para variação do tempo de ciclo de operação	95

Lista de Abreviaturas

P&D – Pesquisa e Desenvolvimento.

MTBF – Mean Time Between Failures (Tempo médio entre falhas)

MTTR – Mean Time To Repair (Tempo médio para reparo)

CNC – Comando Numérico Computadorizado

OEE – Overall Equipment Effectiveness (Eficiência Global do Equipamento)

TPC – Tempo disponível por dia menos as concessões

TPO – Tempo disponível com OEE

CLP – Controle Lógico de Programação

KS – Kolmogorov-Smirnov

AD – Anderson-Darling

χ^2 – Chi-Square (Qui-Quadrado)

PPN – Papel de Probabilidade Normal

GIGO – Garbage in Garbage out (Entra lixo Sai lixo)

V&V – Validação e Verificação

VSM – Value Stream Mapping (Mapeamento do fluxo de valor)

CAD – Computer-aided design (Projeto assistido por Computador)

3D – Imagem em três dimensões

FIFO – First-In; First-Out (Primeiro-entra; Primeiro-sai)

LIFO – Last-In; Last-Out (Último-entra; Último-sai)

SIRO – Service In Random Order (Ordem Aleatória de Atendimento)

SPT – Shortest Processing Time First (Primeiro com Tempo mais Curto de Processamento)

PR – Priority (Prioridade)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVO	3
3. METODOLOGIA	4
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
4.1. Vantagem competitiva na manufatura	13
4.2. Simulação	18
4.2.1. Tipos de Simulação	19
4.2.2. Sistema, Modelo e Evento Discreto	20
4.2.3. Vantagens e desvantagens da aplicação da simulação	24
5. REQUISITOS E RESTRIÇÕES DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO	30
5.1. Requisitos da simulação	30
5.1.1. Implementação do uso da ferramenta de simulação	30
5.1.2. Sistemas da manufatura	35
5.1.3. Teoria das Filas	37
5.1.4. Disponibilidade dos dados de entrada	40
5.1.5. Tratamento dos dados de entrada	42
5.1.6. Software de simulação	44
5.2. Restrições da simulação	46
6. PARTE EXPERIMENTAL	49
6.1. Identificação dos gargalos da manufatura	50
6.2. Definição do problema e dos objetivos do estudo	52
6.3. Elaboração do modelo conceitual	54
6.4. Coleta e validação dos dados de entrada	57
6.5. Construção do modelo computacional	74
6.6. Validação e verificação do modelo	76
7. RESULTADOS	80
8. CONCLUSÕES	96
8.1. Resultados obtidos	96

8.2.	Sugestões para trabalhos futuros	97
8.3.	Contribuições do trabalho.....	97
8.4.	Considerações finais	98
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

1. INTRODUÇÃO

Considerando a competitividade acirrada entre as indústrias atuantes no do mercado mundial, exigindo produtos cada vez mais complexos, com evolução tecnológica acelerada um ciclo de vida dos produtos mais reduzidos e o tempo para lançá-los no mercado cada vez menor, existe a necessidade de administrar a manufatura de forma estratégica para atingir o melhor desempenho global da empresa.

Em virtude da influência determinante da manufatura no desempenho da empresa, esta exerce um importante papel na formulação e implementação da estratégia competitiva. Por serem responsáveis pela maior parte das atividades que agregam valor ao produto, as estratégias associadas à eficácia operacional tais como as iniciativas de qualidade, a reformulação dos processos e investimentos em tecnologia, podem mostrar resultados rápidos, entre 12 a 24 meses. (CHASE, et al., 2004)

Sendo assim, a tomada de decisão para flexibilizar o sistema de manufatura deve ser rápida e sábia, exigindo o contínuo aperfeiçoamento das técnicas e ferramentas de auxílio à decisão, com o objetivo de levar o sistema de manufatura a um patamar de competitividade elevado garantindo a sobrevivência do negócio. (GEORGES, 2005)

Desta maneira, a busca pela vantagem competitiva vai de encontro à utilização de ferramentas dentre as quais pode ser citada a simulação computacional, que se caracteriza por apoiar a tomada de decisão e responder as perguntas do tipo “O que ocorre se...”, ainda nas fases de projeto do sistema de manufatura onde os investimentos ainda são reduzidos.

Segundo Banks, et al. (2001), a simulação é uma ferramenta indispensável na solução de muitos problemas de um processo de manufatura, sendo usada para descrever e analisar o comportamento de um sistema real, além de responder a perguntas associada ao desempenho dos sistemas. A simulação tem uma visão gerencial muito grande, pois a mesma tem uma importância enorme na análise de custo e durante o processo de modelagem são detalhadas as variáveis e as atividades do processo que geram custos excessivos e desperdícios.

Nos modelos de simulação computacional dinâmico são consideradas a aleatoriedade e interdependência das variáveis do sistema, aumentando assim a capacidade de previsão do comportamento do sistema real e diminuindo a margem de erro entre o desempenho projetado e o real, obtido quando da operação do sistema. As vantagens da simulação computacional podem ser

enumeradas quando esta é comparada com a experimentação direta de um sistema real. A principal delas tem relação com os custos envolvidos, ou seja, é muito menos oneroso efetuar experiências com o modelo de simulação do que com o sistema real, especialmente quando equipamentos de alto custo estão envolvidos. Também a experimentação de um sistema real envolve riscos, tanto materiais quanto humanos, o que não ocorre com um sistema simulado em ambiente computacional. (PIDD, 1998)

Simulação de evento discreto é realmente uma das mais poderosas tecnologias para prever o desempenho futuro de sistema, essa tecnologia proporciona para as organizações uma vantagem competitiva sobre as empresas que não usam a mesma. Milhões de dólares estão em jogo ao projetar e re-projetar sistemas complexos, e estudos de simulação irão fornecer uma segurança contra grandes mudanças. Um estudo de simulação de um sistema complexo sempre permite aos analistas de ir além de cálculo estático e fornecer informações precisas sobre o desempenho real das operações. (JURISHICA, 2010)

Apesar de todos os benefícios gerados pela ferramenta de simulação, na engenharia de manufatura ainda não está consagrado o uso desse tipo de ferramenta como em outras áreas da engenharia. Na maioria das vezes, os problemas são tratados utilizando ferramentas comuns, como Microsoft Excel, ou recorrem à intuição dos técnicos e engenheiros mais experientes responsável pelo processo. Isso ocorre, pois existem requisitos e restrições que deixam o processo de simulação na manufatura moroso e não efetivo em certos momentos, relatado pelos autores Harrel, et al. (2000), Banks, et al. (2001), Colmanetti (2001), Carvalho, et al. (2001), Jurishica (2010) e Sturrock (2010), como, dificuldade da justificativa econômica da simulação, falta de suporte da gestão ou do cliente, disponibilidade dos dados de entrada, falta de conhecimento do sistema, falta do conhecimento da ferramenta de simulação, objetivo do projeto não definido com clareza, entre outros.

Diante desta síntese, este trabalho pretende mostrar a vantagem competitiva para a manufatura da aplicação da ferramenta de simulação de evento discreto, promovendo uma discussão dos requisitos e das restrições existentes nesse processo de desenvolvimento de um modelo de simulação de uma linha de fabricação de componentes mecânicos, mais especificamente uma linha de usinagem de peça para motores diesel.

2. OBJETIVO

O objetivo deste trabalho consiste em desenvolver um modelo de simulação baseado na aplicação de conceitos de eventos discretos, aplicado a uma linha de usinagem de um fabricante de motor diesel com a intenção de buscar a vantagem competitiva focada na estratégia de negócio de diferenciação e prioridade de competitividade de flexibilidade.

Para a execução da modelagem o trabalho baseia-se no mapeamento dos requisitos de um projeto de simulação de eventos discretos, ou seja, alguns elementos básicos para execução de um projeto de simulação, visando aprimorar a utilização dessa ferramenta. Adicionalmente, para a execução da modelagem, são discutidas as restrições da ferramenta de simulação empregada, bem como seus efeitos sobre os resultados obtidos com o processamento do modelo computacional.

3. METODOLOGIA

A metodologia para projeto de simulação de um processo de manufatura, pode ser abordada de diferentes maneiras e níveis de detalhamentos. Para definir a melhor metodologia que se enquadra a este trabalho foram estudadas algumas opções.

Chwif, et al.(2006), apresentam o projeto de simulação dividido em três etapas, indicadas na Figura 1, as quais são:

- **Concepção e formulação do modelo:** nesta etapa deve-se entender o sistema e os seus objetivos com clareza, definido o escopo da análise, hipóteses simplificadas para a execução da modelagem e o nível de detalhamento do processo que será utilizado no modelo. Após essas definições, também nessa fase, coletam-se os dados e elabora o modelo conceitual.
- **Implementação do modelo:** nesta etapa o modelo conceitual é convertido em um modelo computacional, gerando alguns resultados para validação do mesmo visando os objetivos já estipulados.
- **Análises dos resultados obtidos:** nesta etapa são realizadas os experimentos, que são as simulações discretas, apresentando os resultados, sendo os mesmos são analisados e documentados, gerando conclusões e recomendações sobre o sistema.

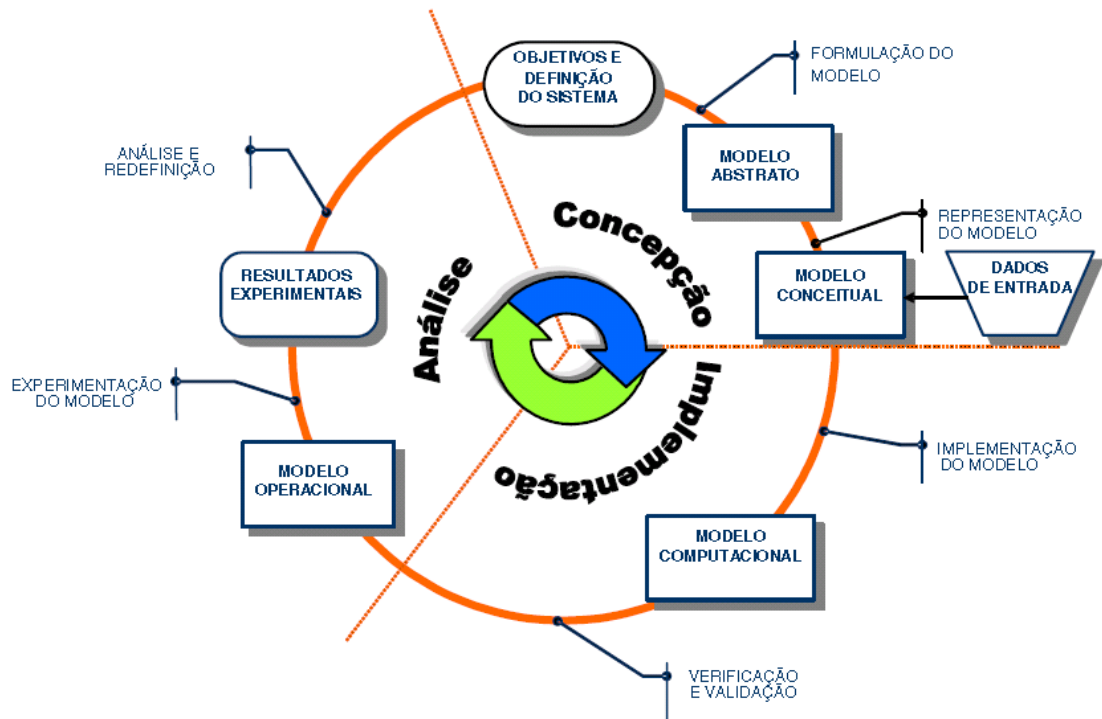


Figura 1: Metodologia de Simulação (CHWIF, et al., 2006)

Para Banks, et al., (2001), um projeto de simulação de evento discreto consiste em doze etapas , podendo ser dividida em quatro macros fases conforme indicado na Figura 2, as quais são:

- **Fase de Planejamento:** esta fase constitui das etapas Formulação do Problema (1ª) e Definição dos Objetivos e do Plano Geral de Projeto (2ª), é o período da descoberta ou orientação, nesse primeiro momento geralmente o problema está bastante confuso,deste modo os objetivos e o plano original do projeto devem ser totalmente esclarecidos e refinados.
- **Fase de Modelagem:** esta fase é relacionada a construção do modelo e coleta dos dados e constitui das etapas Concepção do Modelo (3ª), Coleta de Dados (4ª), Tradução do Modelo (5ª), Verificação (6ª) e Validação (7ª). Uma interação contínua é necessária entre as etapas dessa fase, além da presença do usuário do modelo durante essa fase ser mandatória, pois a ausência do mesmo pode causar implicações terríveis no momento da implementação.

- **Fase de Execução do Modelo:** esta fase constitui das etapas Projeto de Experimentos (8ª), Execuções e Análises (9ª) e Outras Execuções (10ª). Nesse momento deve-se ter um plano bem concebido para a experimentação com o modelo. A simulação estocástica de evento discreto é um experimento estatístico, que possuem entradas aleatórias, consequentemente saídas aleatórias, desta maneira não se pode concluir muita coisa a partir de uma única replicação de simulação.
- **Fase de Implementação:** esta fase envolve as etapas Documentação dos Processos e Resultados (11ª) e Implementação (12ª), o sucesso dessa etapa depende do envolvimento contínuo do usuário do modelo e a conclusão bem sucedida de cada etapa do processo. Nessa fase também ocorre a comparação e a identificação das melhores soluções, apresentando-as para o usuário do modelo, auxiliando-o a tomada de decisão em relação ao problema proposto.

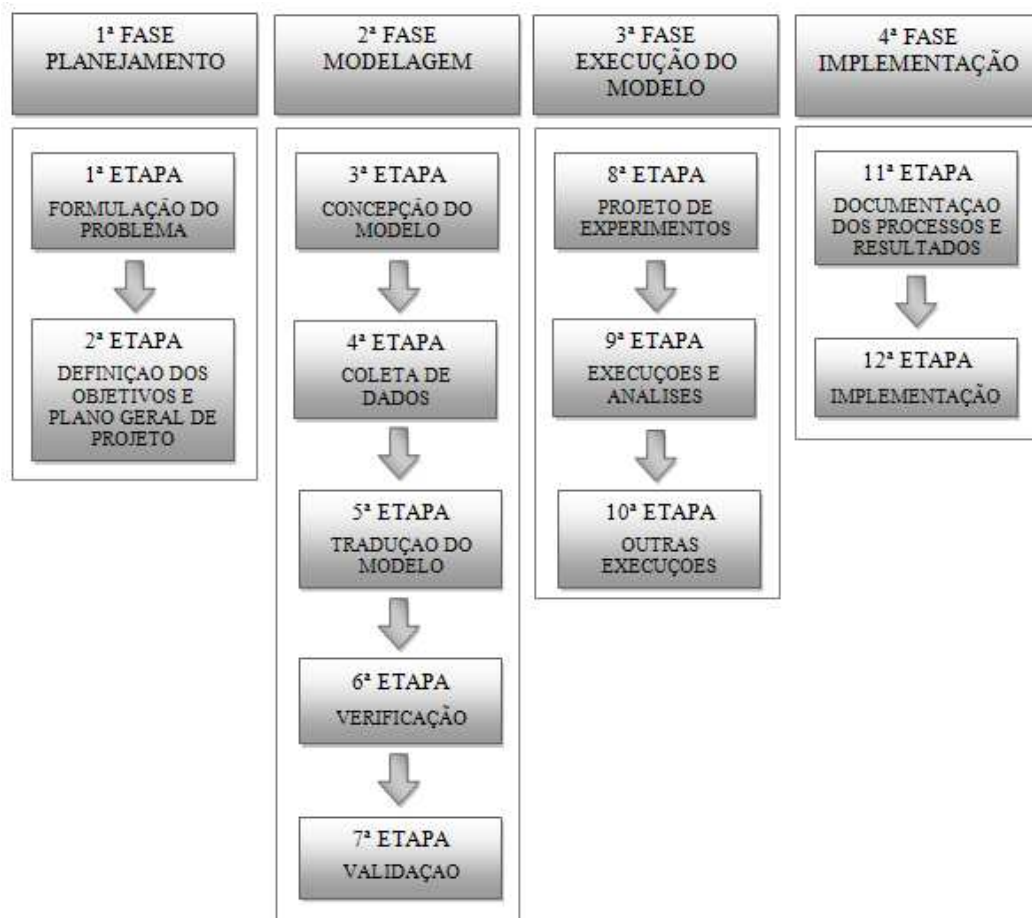


Figura 2: Etapas de um Projeto de Simulação de Eventos Discretos

Analisando as metodologias de simulação apresentadas anteriormente, foi desenvolvido um fluxograma, com base na metodologia de Banks, et al. (2001) para definir a seqüência de execução deste trabalho. Porém acrescentaram-se mais duas etapas antes da etapa da formulação do problema, para direcionar a busca da vantagem competitiva na manufatura através da ferramenta de simulação de evento discretos, como mostra a Figura 3.

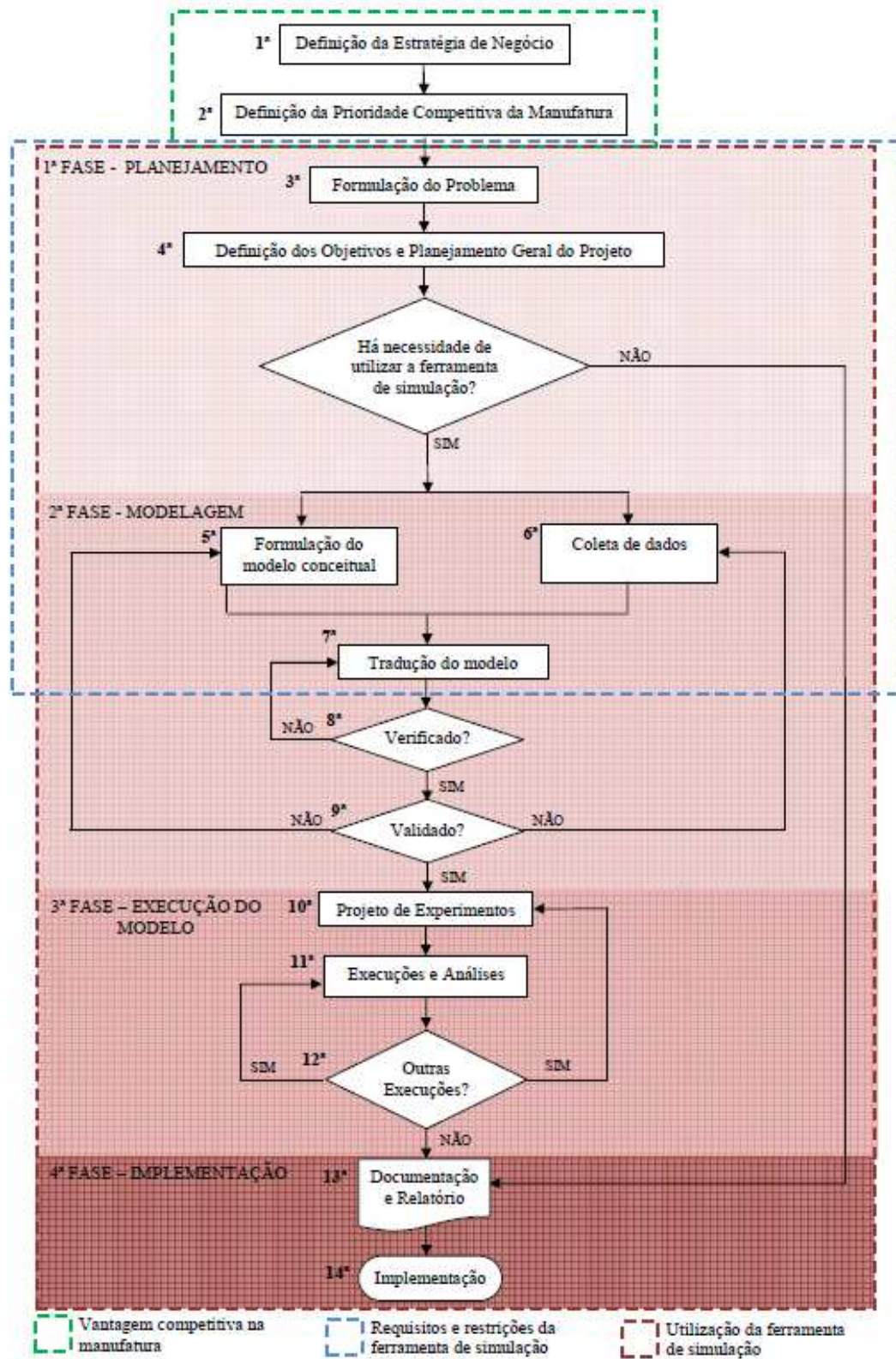


Figura 3: Fluxo de trabalho adaptado de BANKS, et al. (2001)

A seguir segue a descrição de cada etapa do fluxograma de trabalho:

1ª Etapa – Definição da Estratégia de Negócio

Nessa etapa são identificadas as necessidades estratégicas da empresa, visando descrever as bases para obter e manter a vantagem competitiva, uma visão holística e a longo prazo do negócio é fundamental para essa definição.

2ª Etapa – Definição da Prioridade Competitiva da Manufatura

Nessa etapa deve-se definir uma prioridade competitiva da manufatura, facilitando assim a definição do objetivo do trabalho. As quatro prioridades básicas são: custo, qualidade, desempenho de entrega e flexibilidade.

3ª Etapa – Formulação do Problema

Todo estudo de simulação deve ser iniciado com uma descrição do problema, sendo que o analista deve garantir que o problema descrito está claramente entendido. Normalmente as descrições dos problemas são fornecidas por diretrizes da corporação ou por aqueles que possuem um problema, e existem ocasiões que tais problemas devem ser reformulados conforme o progresso do estudo. O solicitante de um projeto de simulação é definido com o usuário do modelo.

4ª Etapa – Definição dos Objetivos e do Plano Geral de Projeto

Os objetivos da simulação indicam as questões a serem respondidas pelo modelo de simulação. Nesse ponto uma decisão deve ser feita considerando se a simulação é a metodologia apropriada para o problema formulado e os objetivos definidos. Assumindo que a simulação é apropriada, o plano geral do projeto deve incluir uma relação das alternativas dos sistemas consideradas e o método para desenvolvê-las com efetividade. Também deve incluir no plano do projeto a quantidade de pessoas envolvidas, custo e um cronograma bem definido expondo cada fase do projeto.

5ª Etapa – Concepção do Modelo

“A construção de um modelo de um sistema é provavelmente mais arte que ciência” (Banks, et al.,2001). A arte da modelagem é intensificada pela capacidade de abstrair as características

essenciais do problema, selecionar e modificar as premissas básicas que caracteriza o sistema e, em seguida, enriquecer e elaborar o modelo até um resultado aproximado útil. Inicialmente, deve ser um modelo simples, cujo nível de detalhamento vai aumentado gradativamente, sem, no entanto, exceder a complexidade necessária para cumprir os propósitos do modelo.

Perera e Liyanage (2000 apud MONTEVECHI, et al.,2010) afirmam que a modelagem conceitual pode aumentar a qualidade do modelo de simulação, e ainda reduz o tempo necessário para a construção do modelo computacional.

Nessa fase é recomendável o envolvimento do usuário do modelo, assim aumenta a qualidade dos resultados do modelo e aumenta a confiança do usuário do modelo na aplicação do modelo de simulação.

6ª Etapa – Coleta de Dados

Nesta etapa são coletados os dados necessários para a construção do modelo. O tipo de dado a ser coletado será definido, sobretudo, pelos objetivos almejados com o estudo. A coleta de dados está em constante interação com a construção do modelo, ou seja, o número de variáveis aumenta de acordo com a complexidade do modelo e o tamanho da amostra aumenta quanto maior for à precisão desejada. Essa atividade requer bastante tempo em relação ao tempo total de desenvolvimento do projeto de simulação, portanto é interessante que comece o mais cedo possível, normalmente junto com a fase de construção do modelo.

7ª Etapa – Tradução do Modelo

Os sistemas reais na maioria das vezes resultam em modelos que requer uma grande quantidade de armazenamento de informação e resultados da computação, deste modo, o modelo deve ser traduzido para uma linguagem computacional, mais especificamente para linguagem de simulação ou *softwares* especializados.

O termo utilizado para essa atividade é programação, embora seja possível realizar estudos com pouca ou nenhuma codificação. Porém o modelador deve escolher o meio de realizar essa programação sendo por *software* de simulação ou linguagem de programação. A linguagem de programação é eficiente e versátil, no entanto, se o problema for sensível a solução com software de simulação, o tempo de desenvolvimento do modelo é bastante reduzido.

8ª Etapa – Verificação

A etapa de verificação está relacionada ao modelo computacional, o mesmo deve ser verificado para garantir um funcionamento adequado. Se forem identificadas falhas ou *bugs*, a tradução do modelo deve ser revista. Caso não sejam identificados problemas, sobretudo na estrutura lógica, a etapa pode ser considerada concluída.

9ª Etapa – Validação

Para que seja validado, o modelo deve ser comparado com o sistema real, analisando as discrepâncias em termos de comportamento, ou seja, determina o quão o modelo está representando corretamente o sistema real. Tal processo deve ser repetido até que a aproximação desejada seja alcançada, respeitando a complexidade planejada no momento da concepção.

10ª Etapa – Projeto de Experimentos

As características das alternativas ao sistema real devem ser determinadas nessa etapa, levando em consideração, entre outros aspectos, os resultados das simulações previamente realizadas. Para cada projeto de sistema simulado, as decisões precisam ser feitas considerando a duração do período de inicialização, a duração das corridas da simulação, e o número de repetições a ser feitas para cada corrida.

11ª Etapa – Execuções e Análises

Em muitos estudos de simulação uma grande quantidade de tempo e dinheiro são gastos no desenvolvimento do modelo e programação, mas pouco esforço é feito para analisar os dados de saída da simulação de forma adequada. (LAW, 2010)

Assim, algumas simulações devem ser executadas e analisadas a fim de avaliar o desempenho das alternativas propostas.

12ª Etapa – Outras Execuções

A partir da análise das execuções realizadas, deve ser determinado se é ou não necessário realizar simulações adicionais para se chegar às conclusões desejadas.

13ª Etapa – Documentação dos Processos e Resultados

Um estudo de simulação deve ser bem documentado, tanto com relação à sua elaboração quanto com relação aos resultados alcançados. A documentação dos trabalhos de programação do modelo é de grande importância, não só para que seja possível alterar o sistema e seus parâmetros no futuro, como para aumentar a credibilidade do projeto. No que tange aos resultados, deve ser feito um relatório claro e objetivo contendo todos os aspectos identificados na simulação e julgados relevantes no sistema.

14ª Etapa – Implementação

O sucesso deste passo depende diretamente de como transcorreram os passos anteriores. De forma especial, é preciso que o usuário do modelo tenha boa informação sobre a sua construção, seja por ter participado das etapas anteriores ou por ter estudado profundamente os relatórios. Mesmo caso todas as demais etapas tenham sido realizadas satisfatoriamente, se o usuário tiver pouco conhecimento sobre o funcionamento lógico do modelo a sua implementação será comprometida.

Para avaliar os requisitos e restrições de modelos de simulação adotou-se o tipo de metodologia de pesquisa de natureza exploratório-bibliográfica.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1. Vantagem competitiva na manufatura

O cenário de competitividade acirrada pela qual as empresas do mundo inteiro vêm passando, onde o mercado não tem fronteiras, vem causando profundas modificações nos sistemas de manufatura, oriundas do rápido processo de desenvolvimento tecnológico de produtos e processos aliado à integração dos mercados mundiais.

“As barreiras que separavam setores econômicos e verticais do mercado, e as empresas que operavam dentro de tais setores estão rapidamente caindo. A competição pode surgir inesperadamente de qualquer lugar. Isto significa que as empresas não podem mais se sentir confiantes com suas fatias de mercado e com suas posições competitivas.” (Tapscott & Caston, 1995 apud GEORGES, 2001).

Nesta situação, a manufatura assume um papel estratégico junto ao objetivo geral das organizações, pois, para obter uma vantagem competitiva, deve-se administrar a manufatura de forma estratégica.

Chase, et al. (2004) define a estratégia competitiva como a busca para selecionar um conjunto de diferentes atividades para entregar um *mix* único de valor. Tal estratégia deve apresentar como a empresa pretende criar e sustentar valor para seus acionistas. Assim, divide-se a estratégia em três componentes principais: eficácia da operação, administração do consumidor e inovação do produto. A estratégia deve estar alinhada com a missão de servir o cliente, tendo como fator complicador as mudanças das necessidades dos clientes com o passar do tempo, implicando em mudanças contínuas na estratégia.

Wheelwright (1984) propõe a divisão das estratégias empresárias em três níveis, como indicado na Figura 4, os quais são:

- **Estratégia Corporativa:** orienta a organização na busca pelo posicionamento em seu ambiente global, econômico, social e político (SLACK, et al., 1997).
- **Estratégias das Unidades de Negócio:** orienta o negócio em um ambiente que consiste em seus consumidores, mercados e concorrentes, mas também inclui a corporação da qual faz parte (SLACK, et al., 1997). Wheelwright e Hayes (1985) definem o escopo do negócio, interligando-o à estratégia corporativa e descrevendo as bases nas quais a unidade de negócio irá obter e manter uma vantagem competitiva.

- **Estratégias funcionais:** todas as funções dentro de uma unidade de negócios (manufatura, pesquisa e desenvolvimento, *marketing*, vendas, finanças, recursos humanos, entre outros) que precisarão traduzir os objetivos do negócio, com o propósito de compreender sua real contribuição para o alcance de tais objetivos. Para tanto, cada função necessita de uma estratégia que defina como elas darão suporte à estratégia do negócio (SLACK, et al., 1997).

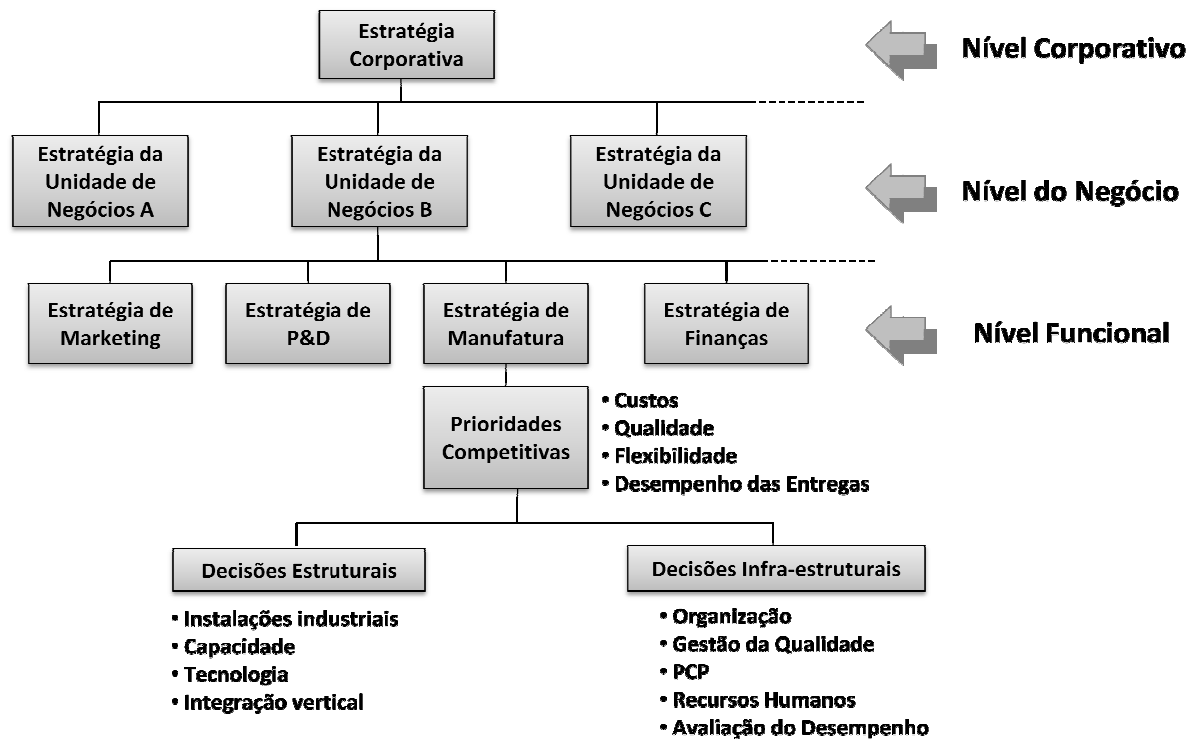


Figura 4: Divisão das estratégias empresariais adaptado de Wheelwright (1984)

Em relação à estratégia de negócios, Porter (1991) propõe uma divisão em duas estratégias básicas: menor custo e diferenciação.

A estratégia de manufatura deve abranger o desenvolvimento e o desdobramento dos recursos da manufatura em total alinhamento com os objetivos e as estratégias da empresa. O conteúdo e a formulação de uma estratégia de manufatura devem convergir para o estabelecimento de dois componentes básicos: o estabelecimento das prioridades competitivas da manufatura, entendidas como um conjunto de opções de prioridades que a manufatura tem para competir no mercado durante certo horizonte de tempo, e o equacionamento e a resolução das questões estruturais, que são relativas às instalações industriais, capacidade, tecnologia, e

integração vertical, e das questões infra-estruturais, que são relativas à organização, gestão da qualidade, PCP, recursos humanos, e avaliação do desempenho. (PIRES, et al., 1999)

As prioridades competitivas da manufatura devem estar dentro de faixas de desempenho para que não gerar incompatibilidades entre elas, conhecidas como *trade-off*. A partir de determinados níveis, algumas dessas prioridades tornam-se incompatíveis, afetando o desempenho de outra. Para conciliar um bom desempenho entre as prioridades competitivas, as mesmas devem ser implementadas gradativamente, após a consolidação de uma prioridade outra poderia ser desenvolvida. (PINTO, et al., 1997)

Pires (1995) classifica as principais dimensões competitivas relacionadas à estratégia de manufatura, como indicado abaixo:

- **Custo:** que significa a busca por um menor custo de produção em relação aos concorrentes;
- **Qualidade:** que implica na oferta de produtos e serviços com qualidade, enfatizando a satisfação do cliente. Nesse item também pode-se citar a melhoria contínua que foi uma dos grandes trunfos das empresas japonesas na conquista de mercados cada vez maiores e mais sofisticados;
- **Desempenho das entregas:** que representa a busca de prazos de entrega cada vez menores e grau de confiabilidade dos mesmos. Além disso, quanto menor o prazo de entrega, menor serão os estoques intermediários e maior será o giro dos estoques e mais cedo será realizada a receita e menores serão os desperdícios e perdas, conceito básico da manufatura enxuta;
- **Flexibilidade:** que representa ter a capacidade de alterar o *mix* dos produtos, processo e volume de produção. Essa prioridade também tem outra abordagem, que é a capacidade que a empresa deve ter para rapidamente adaptar-se às mudanças nas tendências do mercado e deve ser ágil na adaptação de seus produtos às novas exigências do consumidor.

Na Figura 5, pode-se ver a ligação entre o modelo de Porter (1991) das estratégias de negócio e as prioridades definidas por Pires (1995).

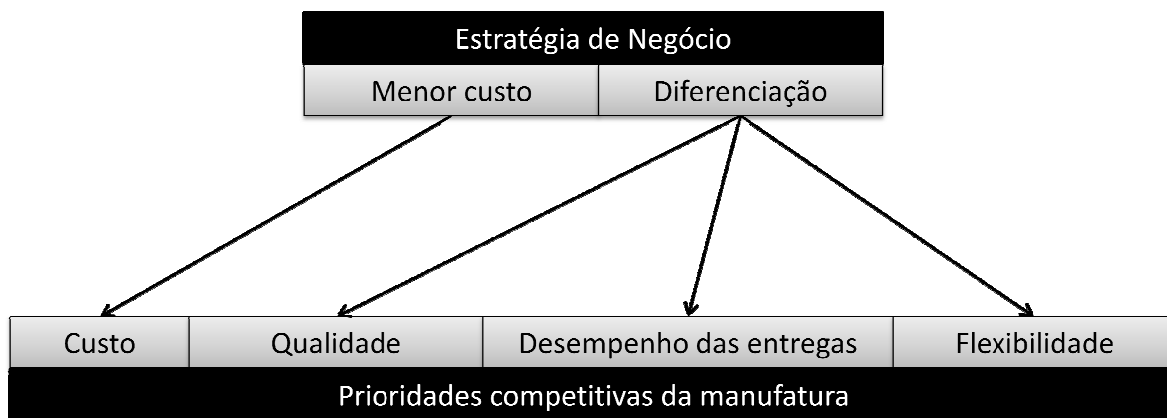


Figura 5: Ligação natural entre as estratégias competitivas e as prioridades competitivas da manufatura (adaptado PIRES, 1995)

Os dois tipos básicos de vantagem competitiva anteriormente mencionada, custo e diferenciação, combinados com a abrangência das atividades realizadas para obtê-los levam, segundo Porter (1990), a três estratégias genéricas: liderança no custo total, diferenciação e enfoque.

- **Liderança no custo total:** A lógica que preside essa estratégia é que, nela, a empresa busca realizar suas atividades de modo a tornar-se o produtor de baixo custo no segmento em que atua, podendo oferecer produtos ou serviços a preços mais competitivos. Assim, a empresa que almeja essa modalidade de estratégia competitiva deve ser ou a líder de custo no setor em que está inserida ou seguir de perto a líder.
- **Diferenciação:** Nessa estratégia, uma empresa busca diferenciar seus produtos por meio da exploração de uma (ou mais) característica(s) não explorada(s) por seus concorrentes, e que são valorizadas pelos compradores, procurando, portanto, ser única em sua indústria. Os modos de diferenciação variam de indústria para indústria. A diferenciação pode basear-se em alguns atributos relacionados com o próprio produto, com o sistema de entrega dos produtos, com os métodos de *marketing*, entre outros fatores. Assim, a estética do produto, a confiabilidade do produto, rapidez no processamento e nas entregas, imagem da marca e assistência técnica são alguns dos fatores estratégicos de diferenciação. Como consequência da escolha por uma

estratégia de diferenciação, uma empresa poderá ser “recompensada” através de um preço adicional cobrado dos compradores (preço-prêmio).

- **Enfoque:** Essa estratégia, diferentemente das anteriores, baseia-se na premissa de que uma empresa é capaz de atender seu objetivo estratégico num escopo estreito, de forma mais efetiva ou eficiente do que seus concorrentes que atuam em escopo amplo. Assim, uma empresa alcança a diferenciação por satisfazer melhor as necessidades de um segmento-alvo ou custos mais baixos na obtenção desse segmento, ou ambos (Porter,1991). A estratégia de enfoque tem, conforme esse autor, duas variantes: enfoque no custo e enfoque na diferenciação. Através do enfoque no custo, uma empresa persegue uma vantagem competitiva de custo, enquanto, pelo enfoque na diferenciação, uma empresa busca a diferenciação, ambos relacionados com o segmento-alvo escolhido.

Na nova era da informação, as empresas devem tomar todo tipo de cuidado para saber usar o conceito de estratégia genérica de forma adequada, para evitar que surjam prejuízos, por causa de um investimento mal feito, uma parceria mal realizada, uma má condução de negócios e de outras tarefas que visem trazer o lucro e competitividade para a empresa (Stewart, 1998 apud GEORGES, 2001).

A seguir, alguns fatores de suma importância para manter uma empresa com desenvolvimento sustentável e competitiva nos atuais níveis de competição são listados, (Edvinsson e Malone, 1998 apud GEORGES, 2001):

- **A inovação,** deve ser considerada como a principal força motriz de uma empresa, e deverá sempre ser alimentada pelo investimento e pelo apoio do alto escalão administrativo;
- **A flexibilidade,** adaptabilidade e rapidez são características essenciais que uma empresa deve ter, para sobreviver numa era de fracasso institucional, na qual o antigo sistema de valores e as formas tradicionais de organização não produzem mais efeito;
- **Vigilância** constante à modernização de novas tecnologias para não ficarem defasadas em relação as outras empresas, pois a sua falta pode ameaçar não só os seu produtos como a sua própria maneira de conduzir os negócios;

- **Estruturação de uma organização** dinâmica que saiba congrega clientes, empregados e parceiros estratégicos na busca de relacionamentos, produtos e ambientes de trabalhos que criem um alto nível de excitação, criatividade e satisfação;
- **Estabelecimento de uma filosofia corporativa sólida** baseada nas histórias e tradições da empresa e cuja utilização incute em cada empregado um modelo de comportamento alinhado a essa filosofia;

Para Georges (2001), uma empresa deve se antecipar aos acontecimentos do mercado para atingir a competitividade, caracterizando uma atitude pró-ativa. Tal atitude deve ter uma infraestrutura organizacional que suporte as mudanças necessárias na busca por uma vantagem competitiva.

As duas primeiras etapas do fluxograma desse trabalho, estão diretamente relacionadas com o que foi descrito nesse capítulo, porém para as mesmas ocorrerem além do conhecimento teórico delas, o suporte do corpo diretivo da organização deve estar envolvido, para a definição da meta e objetivo do projeto a ser desenvolvido.

4.2. Simulação

A simulação foi desenvolvida na década de 50, iniciando nas atividades militares, expandindo-se para outras áreas como manufatura e serviços nos anos 80, porém intensificando sua popularidade apenas na década de 90. De acordo com Chwif (1999), esta popularidade pode ser explicada por alguns fatores, tais como:

1. Desenvolvimento de capacidade dos computadores, que apresentou grande crescimento nos últimos anos;
2. Desenvolvimento de softwares de simulação, com interfaces homem-máquina mais "amigáveis" e com capacidade de processamento gráfico;
3. Natureza da simulação: capacidade de avaliar sistemas complexos e modelar seu comportamento dinâmico, sendo especialmente importante quando inexiste solução analítica através de modelos matemáticos.

A simulação é definida de várias maneiras por diferentes autores, sendo a seguir apresentada algumas destas definições.

“Simulação é a imitação de uma operação de um processo do mundo real ou de um sistema ao longo do tempo” (BANKS, et al., 2001).

“Simulação é o processo de desenhar um modelo de um sistema real e conduzir experimentos com este modelo, com o propósito de compreender o comportamento do sistema e/ou avaliar várias estratégias para operação do sistema” (PEGDEN, et al., 1995).

“Uma imitação (em um computador) de um sistema que evolui através do tempo” (ROBINSON, 2004).

Todos estes conceitos convergem para a mesma idéia, a qual é: uma ferramenta para análise de sistemas muito complexos, que possui aleatoriedade e interdependência entre as variáveis que o compõe, obtendo-se respostas para sentenças do tipo “O que ocorre se..”, ou seja o que ocorre se alguma das variáveis que compõe o sistema for alterada.

4.2.1. Tipos de Simulação

De acordo com Chwif, et al.,(2006) a simulação computacional é classificada em três categorias básicas:

- **Simulação de Monte Carlo:** também conhecida como simulação estática. Utiliza-se de geradores de números aleatórios para simular sistemas físicos ou matemáticos, nos quais não se considera o tempo explicitamente como uma variável.
- **Simulação Contínua:** é aquela em que as variáveis de estado mudam continuamente ao longo do tempo.

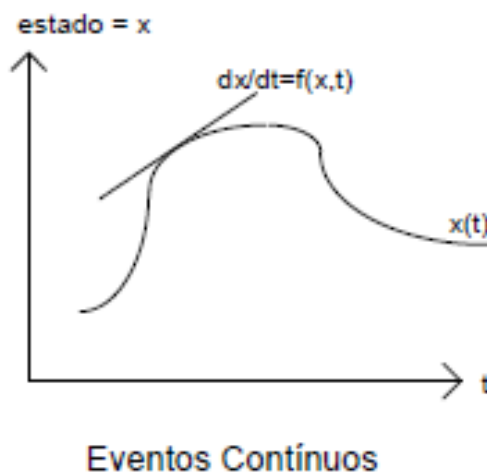


Figura 6: Interpretação Gráfica de uma Simulação Contínua (CHWIF, 1999)

- **Simulação de Evento Discretos:** é utilizada para modelar sistemas que mudam o seu estado em pontos discretos no tempo, a partir da ocorrência de eventos específicos.

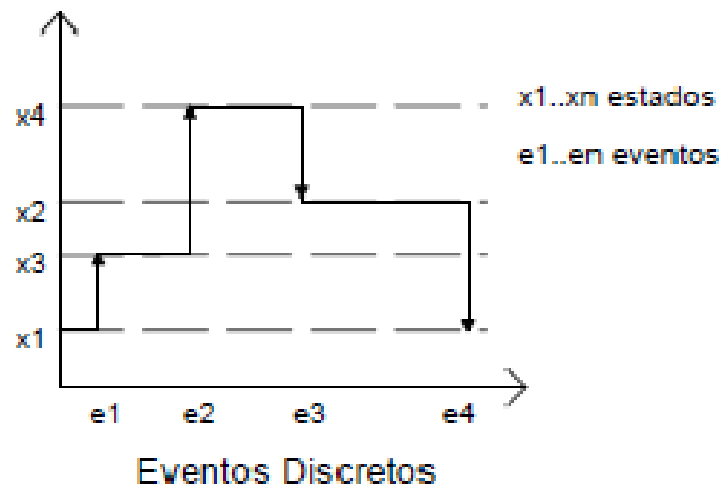


Figura 7: Interpretação Gráfica de uma Simulação de Evento Discreto (CHWIF, 1999)

4.2.2. Sistema, Modelo e Evento Discreto

4.2.2.1. Sistema

Banks, et al. (2001) definem sistema como um grupo de objetos que interagem entre si de forma a alcançar algum objetivo.

Os elementos de um sistema segundo Oliveira (1999), citado por Georges (2005) são:

- Os objetivos, no qual todas as partes concorrem mutuamente;
- As entradas, que fornecem material, informação, energia e outros insumos;.
- Os processos, que transformam as entradas em saídas;
- As saídas, que correspondem aos resultados do processo de transformação;
- Os controles, que verificam a coerência das saídas com os objetivos; e
- A retroalimentação, que transforma em entradas a informação da discordância das saídas e os objetivos, promovendo a homeostase do sistema.

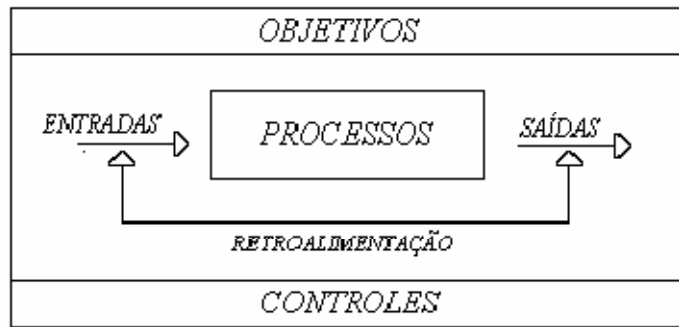


Figura 8: A representação gráfica de um sistema (GEORGES, 2005)

A fim de entender e analisar um sistema, se faz necessário definir os principais termos, chamados de componentes do mesmo (BANKS, et al., 2001):

- **Entidade:** objeto de interesse do sistema;
- **Atributo:** propriedade de uma entidade;
- **Atividade:** tarefa sendo feita pela entidade fixa ou recurso num período de tempo;
- **Recurso:** é a entidade fixa que executa uma determinada atividade para a entidade dinâmica;
- **Estado:** variáveis necessárias para descrever o sistema num instante qualquer;
- **Evento:** ocorrência que poderão alterar o estado do sistema;
- **Endógeno:** relativo a atividade e eventos que ocorrem dentro do sistema;
- **Exógeno:** relativo a atividade e eventos no meio que afetam o sistema.

Na Tabela 1, para efeito ilustrativo apresentam-se alguns exemplos de sistemas e seus componentes.

Tabela 1: Exemplo de Sistemas e seus Componentes adaptado (BANKS, et al., 2001).

SISTEMA	ENTIDADES	ATRIBUTOS	ATIVIDADES	EVENTOS	VARIÁVEIS DE ESTADO
Banco	Clientes	Saldo em conta	Realizar depósito	Chegada; Saída	Número de caixas ocupados; número de clientes esperando
Trem bala	Passageiros	Origem e destino	Viajar	Chegada na estação; Chegada ao destino	Número de passageiros esperando na estação; número de passageiros em trânsito
Produção	Máquinas	Velocidade; capacidade; taxa de quebra	Soldagem; estampagem	Quebra	Estado da máquina (ocupada, ociosa ou quebrada)
Comunicações	Mensagens	Tamanho; destino	Transmissão	Chegada ao destino	Número esperando para ser transmitido
Inventário	Estoque	Capacidade	Saídas	Demanda	Nível de estoque; pedidos atrasados

4.2.2.2. Modelo

O modelo é definido como uma representação das relações dos componentes de um sistema, sendo considerada como uma abstração, no sentido em que tende a se aproximar do verdadeiro comportamento do sistema. (CHWIF, 1999)

Banks, et al. (2001) elucidam o modelo como uma simplificação do sistema, contendo estritamente os elementos que afetem de alguma forma o problema em estudo. Por outro lado, deve contar com um detalhamento que seja suficiente para possibilitar a validação das deduções realizadas.

Na representação de um sistema real por um modelo, ilustrado na Figura 9, as entradas são definidas como um conjunto de variáveis mensuráveis, caracterizadas como: dados, informações, materiais, recursos humanos e outros. Onde as mesmas alimentam o modelo, sendo processadas em um intervalo de tempo, gerando as variáveis de saídas que são coletadas como dados de saída.

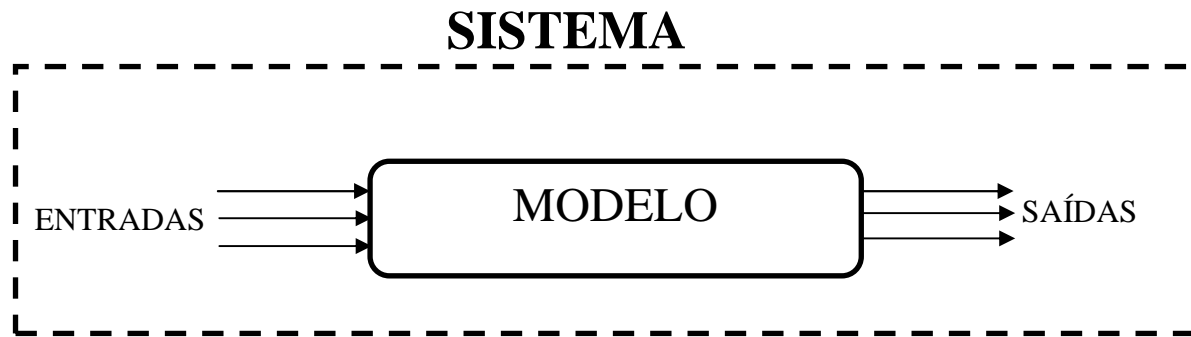


Figura 9: Representação do Sistema por um Modelo adaptado (GEORGES, 2005)

Powell, et al., (2010) descrevem a modelagem como o processo de criação de uma representação simplificada da realidade e trabalho com essa representação, a fim de compreender ou antecipar ocorrência de alguns aspectos do mundo. Sendo a disciplina que fornece uma estrutura para a solução de problemas, e portanto deve-se estudar primeiramente a modelagem, pois melhora a habilidade de pensar no comportamento do sistema.

Os autores Banks, et al. (2001) e Pidd (1998) classificam os tipos de modelos da seguinte forma:

- **Modelos matemáticos:** utilizam notações e equações matemáticas para representar um sistema;
- **Modelos físicos:** assume a forma física do sistema, reproduzindo o sistema real. Muito utilizado em engenharia de produto auxiliando o desenvolvimento de projetos de carro, avião, barco, prédios e outros.
- Modelos para simulação computacional podem ser classificados:
 - **Modelo Estático:** é aquele que representa o sistema em um instante específico;
 - **Modelo Dinâmico:** é caracterizado por representar o comportamento do sistema ao longo de um intervalo determinado de tempo.
 - **Modelo Determinístico:** não possui variáveis com comportamento probabilístico;
 - **Modelo Estocástico:** possui comportamento aleatório, ou seja, variáveis com probabilidade;

4.2.2.3. Evento Discreto

A simulação de sistemas de eventos discretos corresponde à modelagem de sistemas nos quais as variáveis de estado mudam apenas em um conjunto de instantes discretos no tempo. Segundo Banks, et al.,(2001) os modelos deste tipo são analisados aplicando métodos numéricos em vez de métodos analíticos. Métodos analíticos empregam o raciocínio dedutivo matematicamente para resolver o modelo, enquanto métodos numéricos empregam procedimentos computacionais para resolver modelos matemáticos. Modelos de simulação, que empregam métodos numéricos são executados em vez de resolvidos, o que significa que um histórico artificial do sistema é gerado baseado nas premissas do modelo e observações são coletadas para serem analisadas e, só então, obtêm estimativas para as medidas de desempenho do sistema. Uma vez que modelos de simulação do sistema real são bastante grandes e a quantidade de dados armazenados e manipulados é bem vasta, as corridas são conduzidas com auxílio de computador e normalmente são demoradas.

Em simulação de eventos discretos, o sistema é modelado em termos do seu estado ao longo do tempo, das entidades que passam pelo sistema, das entidades que representam seus recursos e das atividades e eventos que provocam as suas alterações de estado. (BANKS, et al., 2001).

4.2.3. Vantagens e desvantagens da aplicação da simulação

Pidd (1998) relata que a modelagem computacional de um sistema é uma tarefa que exige muito esforço por parte do modelador e que, se conduzida com raciocínio cuidadoso e planejada, será bastante eficiente. Para que isto ocorra, o autor propõe cinco princípios básicos e indispensáveis em qualquer metodologia para a implementação da simulação:

- o modelo deve ser simples apesar de partir de pensamentos complexos. Os modelos não necessitam ser tão complicados quanto à realidade;
- realizar de forma parcial, começando do simples, e acrescentar complexidade na medida do necessário;
- evitar grandes modelos pela dificuldade em entendê-los. A regra é dividir esses grandes modelos em modelos menores;
- a definição dos dados a serem coletados deve ser orientada pelo modelo;

- o comportamento do modelador na construção do modelo seria como este estivesse desembaraçando-se dos problemas pois a modelagem de forma alguma é um processo desordenado.

A aplicação da simulação permite avaliar sistemas de produção complexos pela análise da interação entre seus componentes. Particularmente em sistemas de produção automatizados, a simulação concentra-se em avaliar como a interação entre recursos (máquinas, equipamentos e pessoal) afeta o desempenho global do sistema. (SAAD, 2003)

Segundo Banks, et al. (2001), antes da implantação direta de qualquer mudança no sistema produtivo, o mapeamento do processo, a análise dos dados e a simulação computacional podem reduzir com sucesso o risco da ineficácia de uma operação de reprojeção no sistema real.

Para Law et al.,(2000), o benefício geral de se aplicar a simulação à produção é que ela permite ao engenheiro ou gerente obter uma visão sistêmica do efeito que alterações locais terão sobre o desempenho global do sistema de produção.

Assim os autores como Askin , et al.,(1993), Banks, et al.,(2001), Law et al.,(2000) e Oliveira (2008) identificam aplicações para solucionar problemas de manufatura e auxílio à implementação da filosofia de produção enxuta com a aplicação da simulação, tais como:

- Identificar a melhor estratégia de um investimento futuro, seja ele para um novo projeto ou uma operação já existente, antes que haja um comprometimento da organização;
- Avaliar novas alternativas e métodos, antes da sua implementação, de forma a não causar interferência no processo em uso naquele momento ou quando os custos, os riscos ou a logística de manipulação do sistema real é proibitiva, obtendo uma idéia mais nítida do processo que deseja melhorar.
- Dimensionamento de recurso físico e mão-de-obra, avaliando sistemas de movimentação de materiais, “pulmões”de estoque e *mix* de produção;
- Avaliação de decisões operacionais: níveis de estoque, programas de produção, níveis de controle de sistemas automatizados, confiabilidade de atividades de manutenção e de controle de qualidade.
- Mapeamento dos processos, levantando-se os tempos de ciclo de cada operação e de transporte, o número de funcionários envolvidos, tempos de *setup* e o estoque de produto semi-elaborado (filas) antes de cada estação de trabalho;

- Determinação do *lead time* (tempo total de transformação da matéria prima em produto final; tempo do pedido à entrega; tempo de processamento de todas as operações de produção) e do tempo *takt*;
- Identificação dos gargalos de produção;
- Estudo de alternativas de mudanças com base nas técnicas aplicáveis à manufatura enxuta, relacionadas aos tempos de ciclo, *setup*, inclusão/exclusão de mão de obra, redução de distâncias entre operações e todas as idéias que permitirão visualizar melhorias no sistema;
- Realização dos eventos *kaizen* de melhoria e comparação com os resultados da simulação.

Através das aplicações da simulação relacionadas anteriormente, pode-se relacionar algumas vantagens e desvantagens de usar a simulação como ferramenta de apoio à decisão. De acordo com Georges (2005), é importante que o simulacionista conheça as vantagens e desvantagens da simulação para informar a pessoa, que recorrer ao auxílio da ferramenta de simulação, para não criar falsas expectativas sobre os resultados provenientes desta ferramenta.

As vantagens da simulação são citadas por Banks, et al.,(2001), Law et al.,(2000), Pegden, et al.,(1995), Pidd (1998), entre outros, e estão relacionadas abaixo:

- Possibilita economia da utilização do recurso (máquinas) e de mão-de-obra, e isto se torna mais evidente quando ocorre algo de errado na experimentação do sistema real;
- O modelo, uma vez criado, pode ser utilizado inúmeras vezes para avaliar projetos, além de ser possível simular semanas, meses e até anos em pouco tempo no computador, ou seja, o tempo pode ser controlado, reproduzido de maneira lenta ou acelerada, para que se possa melhor estudar os resultados do processo.
- A simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que os métodos analíticos;
- No mundo real é muito difícil assegurar as mesmas condições para replicar uma experimentação direta, o que não ocorre com a simulação, que é precisamente replicável, ou seja, maior controle sobre as condições experimentais, admitindo mais replicações no modelo designando-se os valores que se deseja para todos os parâmetros, assim podendo testar alternativas diferentes para o sistema;

- Somente através da simulação é possível observar o comportamento do sistema em condições extremas de funcionamento sem pôr em risco a vida de pessoas, a segurança pública e a do próprio negócio;
- Somente a simulação pode responder questões que não podem ser experimentadas devido a proibição legal, como diminuição de carga horária ou o uso de equipamentos ou combustíveis não permitidos;
- Os modelos de simulação permitem que sistemas reais, novas políticas e procedimentos operacionais, regras de decisão, fluxo de informações, entre outros, podem ser avaliados sem que o sistema real seja perturbado;
- Pode-se compreender melhor quais variáveis são as mais importantes em relação ao desempenho e como interagem entre si e com os outros elementos do sistema;
- Um estudo de simulação costuma mostrar como realmente um sistema trabalha em oposição à maneira como todos pensam que ele opera;
- Novas situações sobre as quais se tenha pouco conhecimento e experiência podem ser tratadas de tal forma que se possa ter, teoricamente, alguma preparação diante de futuros eventos. A simulação é uma ferramenta especial para explorar questões do tipo: “o que aconteceria se?”;
- Sistemas complexos que contenham elementos estocásticos, que não conseguem ser descritos perfeitamente por modelos matemáticos resolvidos analiticamente, podem ser estudados por simulação;
- É, em geral, mais econômico que testar o sistema real e evitam-se gastos inúteis na compra de equipamentos desnecessários.

Ainda os mesmos autores relacionam as desvantagens como:

- A construção do modelo requer treinamento especial. A técnica de modelagem é uma arte que é aprendida e aperfeiçoada com o tempo e ao longo de experiências;
- Os resultados da simulação podem ser difíceis de interpretar, pois, geralmente, as saídas da simulação são variáveis aleatórias dificultando a identificação de quando uma observação é resultado de uma inter-relação do sistema ou uma aleatoriedade do sistema;
- A modelagem e a análise da simulação podem ser dispendiosas em termos de recursos financeiros e tempo;

- A programação de um modelo de simulação pode se tornar uma tarefa altamente desgastante e custosa, se os recursos computacionais não forem apropriados;
- Devido a sua natureza estocástica, os modelos de simulação devem ser processados várias vezes, para poder prever o desempenho do sistema;
- A simulação é muito dependente da validade do modelo desenvolvido, ou seja, de nada adianta se fazer um estudo detalhado dos dados de saída, encontrar uma solução para o problema se o modelo criado não representar fidedigamente o sistema, ou mesmo se os dados de entrada não forem corretos. Existe um acrônimo em inglês muito utilizado na área de simulação, GIGO, a expressão “Garbage in, Garbage out”, em português “Lixo entra, Lixo sai”.

Um erro realizado por alguns analistas e usuários da ferramenta de simulação consiste em considerar a simulação como uma simples cópia da realidade ou como um exercício de programação em computador. Devido a esse tipo de pensamento, muitos estudos de simulação têm sido submetidos às verificações e validações insuficientes.

A simulação é uma ferramenta poderosa na avaliação de problemas e ações de melhoria, porém requer um grande esforço metodológico e um rigoroso estudo estatísticos para levar a conclusões satisfatórias.

Baseado nas discussões acima, necessita-se analisar quando o uso da simulação é apropriado e quando não é uma ferramenta apropriada. Banks, et al.,(2001), informam as seguintes possibilidades para a utilização da simulação:

- Quando se deseja conhecer os efeitos de alterações a serem realizadas em mudanças organizacionais e ambientais;
- Quando se deseja experimentar as interações internas de sistemas complexos ou subsistema de um sistema complexo;
- Para conhecer as mais importantes variáveis de sistema através da mudança da dos dados de entrada e verificação dos resultados da simulação;
- Como instrumento de planejamento de preparação para incorporar mudanças operacionais (políticas de produção, níveis de estoque, regras de operações em geral);
- Para requisitar novos equipamentos visando a melhoria da produção tendo em vista dificuldades diferenciadas através da simulação da capacidade instalada;
- Para verificar soluções obtidas por métodos analíticos;

- Modernos sistemas (fábrica, indústria de serviços, entre outros) são tão complexos que suas interações só podem ser compreendidas via simulação.

Para ilustrar quando o uso da simulação não é apropriado, Banks et al., (1997) expressam dez regras que determinam quando a simulação não é uma ferramenta apropriada, são elas:

- Não use a simulação quando o problema pode ser resolvido utilizando o senso comum;
- Não use a simulação quando o problema pode ser resolvido analiticamente;
- Não use a simulação quando é fácil de realizar experimentação direta sobre o sistema que seria simulado;
- Não use a simulação quando o benefício monetário advindo da simulação é inferior ao custo do projeto de simulação;
- Não use a simulação quando não há recursos o suficiente para pagar todas as etapas de um projeto de simulação;
- Não use a simulação quando o tempo não é suficiente. Projetos de simulação não são feitos em semanas, mas em meses;
- Não use a simulação se não há dados o suficiente para estimar parâmetros do modelo;
- Não use simulação se não for possível verificar ou validar o modelo;
- Não use a simulação se as expectativas não forem razoáveis (muito grandes ou muito baixas) ou se o poder da simulação é superestimado;
- Não use a simulação se o comportamento do sistema é extremamente complexo ou que não possa ser definido.

Avaliando os pontos acima a simulação oferece mais benefícios do que desvantagens, sendo uma ferramenta essencial para tomada de decisão.

5. REQUISITOS E RESTRIÇÕES DA FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO

Esse capítulo tem o intuito de apresentar alguns pontos relevantes para a ferramenta de simulação, e abordá-los de maneira a não esgotar o assunto, nem mesmo entrar no mérito analítico pertinente aos mesmos, a idéia é apresentar elementos que contribuem para melhor utilização da ferramenta de simulação.

5.1. Requisitos da simulação

5.1.1. Implementação do uso da ferramenta de simulação

De acordo com Gomes (2009) a simulação pode ser aplicada em todo o ciclo de desenvolvimento da manufatura, como mostra a Figura 10. Sendo possível executar uma fábrica digital, avaliando desde a infra-estrutura, sistemas de manufatura e fluxo de processo e logísticos.

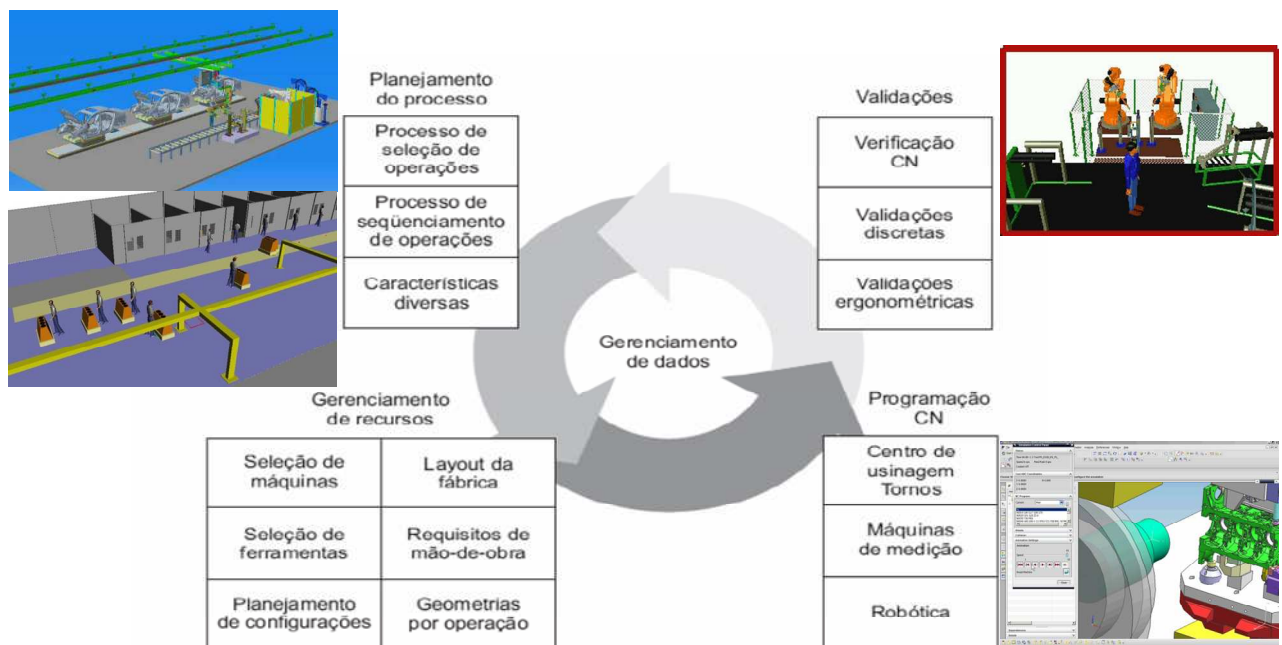


Figura 10: Áreas de aplicação da ferramenta de simulação na manufatura (GOMES, 2009)

Ao utilizar qualquer *software* de simulação os custos envolvidos no processo devem ser considerados e analisados. Da mesma forma no uso da simulação deve-se considerar o custo-benefício da sua aplicação, pois a necessidade de investimento para implantação de um sistema

de simulação (*software*, *hardware*, treinamento e mão-de-obra), freqüentemente prejudica a aplicação da mesma, devido não ser avaliado corretamente o benefício que a simulação poderá trazer ao negócio com a economia de gastos e tempo para implantação do projeto em estudo pela empresa (HARREL, et al., 2000).

Uma das dificuldades da justificativa econômica da simulação é o fato de geralmente não se conseguir avaliar qual será a economia total gerada no projeto, conseguindo-se este valor somente após a sua conclusão.

O desenvolvimento de um projeto ou sistema, é constituído por diferentes fases com características distintas entre si, ou seja, cada qual com o seu tempo e custo. A Figura 11 apresenta a relação entre as fases do projeto e seu custo, sendo que o custo aumenta ao chegar na fase de implementação e operação.

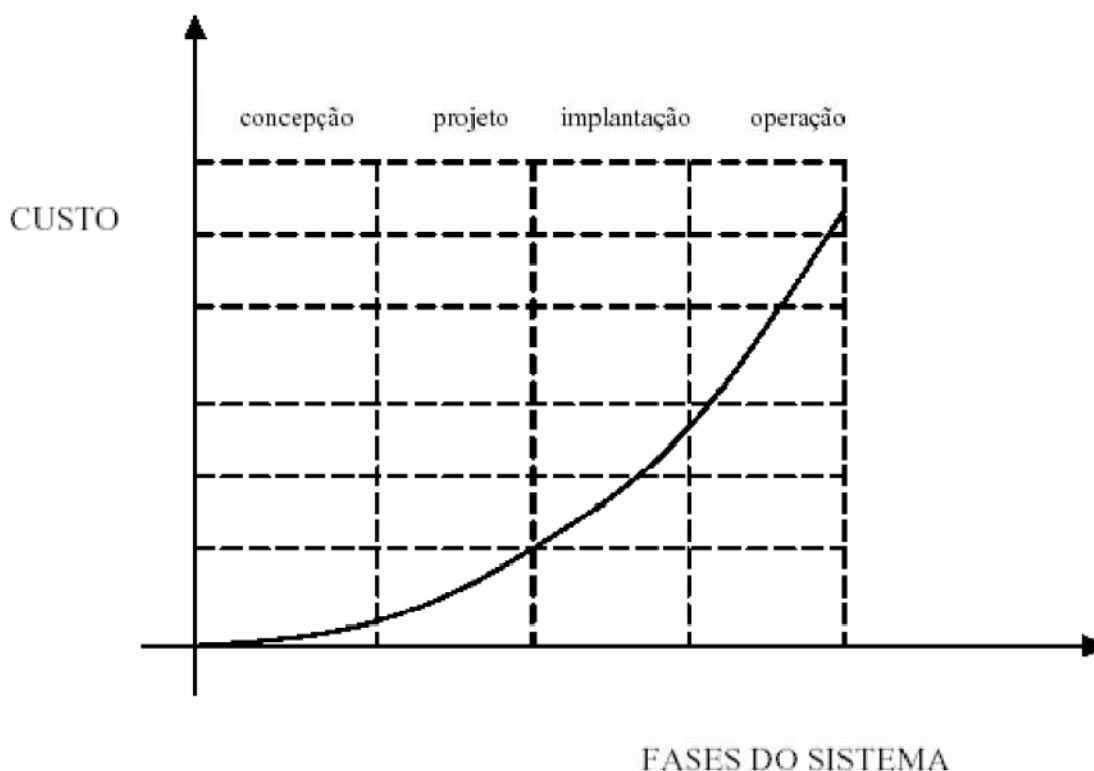


Figura 11: Evolução do custo de um sistema em suas diferentes fases (HARREL, et al., 2000).

Quando a simulação é aplicada no desenvolvimento de um projeto ou sistema, a relação entre o custo e as fases do projeto é alterada, como mostrado na Figura 12. A primeira fase, concepção

do projeto, não sofre nenhum impacto, pois a aplicação da simulação é realizada na etapa seguinte.



Figura 12: Comparativo da evolução dos custos com e sem aplicação da simulação (HARREL, et al., 2000)

Ainda na Figura12, pode-se observar que o custo na fase de projeto fica mais elevado, mas é exatamente nessa fase, com o auxílio da simulação, onde se planeja um sistema mais otimizado, conseqüentemente nas fases de implantação e operação se obtém uma redução de custo. Analisando o gráfico de forma geral, a área abaixo da curva dos custos com a simulação é menor que a dos custos sem a simulação, ou seja, o custo total ao final do projeto é menor quando a simulação é utilizada.

Não apenas o custo deve ser avaliado na implementação da ferramenta de simulação, existem outros fatores críticos para o sucesso da mesma que torna essa atividade o requisito mais importante na utilização da ferramenta de simulação, tais como: comprometimento da alta administração, conhecimento da ferramenta de simulação e capacitação das pessoas.

A evolução das pesquisas e novas tecnologias vêm cooperando para resolução de alguns dos problemas citados. Empresas de programas de simulação têm desenvolvido produtos mais

amigáveis ao usuário em relação à modelagem, ou seja, pacotes com modelos pré-determinados necessitando apenas dos dados de entrada e pacotes que possuem capacidade de análise dos dados de saída, eliminando a necessidade de conhecimentos computacionais pelo usuário e redução do tempo de desenvolvimento do projeto.

Porém, toda nova ferramenta aplicada na empresa para ser implementada precisa de um planejamento estratégico, ou seja, é necessário que esta implementação seja desenvolvida metodicamente em etapas que estejam dentro do nível de entendimento dos empregados (MELO, et al., 2004).

O meio mais convincente de aplicar a ferramenta de simulação pode ser associado ao uso de simulação em projetos de manufatura enxuta, pois o conceito de manufatura enxuta já está consagrado no ramo automobilístico e possui a confiança e comprometimento da alta administração na utilização do mesmo.

O projeto de manufatura enxuta normalmente segue as etapas de realizar o mapa do fluxo de valor, conhecido como VSM (*Value Stream Mapping*), tendo como resultado o mapa do estado atual. O mesmo é analisado pela equipe do projeto, sendo redesenhado e apresentado o mapa do estado futuro, então programado os eventos *kaizen* para implementação das melhorias. O VSM é uma forma rápida de identificar pontos de melhoria, porém o mesmo é classificado em um modelo estático e determinístico, ou seja, analisa a situação em apenas um momento, quando se utiliza de dados históricos baseado em médias, assim não considerando a aleatoriedade do sistema.

Segundo Oliveira (2008), essa forma de analisar, propor e implementar melhorias de projetos de manufatura enxuta entra normalmente num ciclo de tentativa e erro da experimentação direta. Ocasionalmente a implementação de projetos que custam caro e não trazem o retorno visualizado no mapa do estado futuro. Desta maneira o mesmo autor classifica duas fortes premissas:

- A aplicação dos conceitos da manufatura enxuta nos processos produtivos torna as empresas mais organizadas e competitivas;
- A simulação permite a visualização, a baixo custo, das implicações de mudanças nos processos.

A utilização de simulação em projetos de manufatura enxuta, dará à alta e média gerência, a base para a tomada de decisão consciente e consistente, eliminando as insatisfações e os altos

custos associados aos projetos implementados através da tentativa e erro da experimentação direta.

De acordo com Carvalho, et al., (2001) para desenvolver um estudo sobre simulação é importante que alguns requisitos sejam seguidos, tais como:

- Grupo de trabalho deve ser formado por pessoas de diversas áreas, como: Estatística, Computação, Engenheiro da área de manufatura, pessoal especializado em modelagem e pessoal da própria empresa;
- Levantamento do sistema real e todas as variáveis que possam interferir no sistema;
- Conhecimento da área a ser analisada, bem como das expectativas de resultados;
- Entrosamento da equipe com o pessoal da empresa;
- Disponibilidade de recursos (tempo, pessoal, dinheiro, informações);
- Pessoal treinado na empresa para realizar estudos e pessoal para coordenação de estudos futuros, mesmo que esse trabalho seja feito juntamente com pessoal de consultoria.

Segundo Georges (2005) para uma implementação com sucesso da ferramenta de simulação é necessário definir um organograma, que descreve as pessoas e as funções que as mesmas desempenham. Porém não existe um organograma padrão para uma equipe que desenvolve projetos de simulação, mas o mesmo autor sugere a utilização do organograma constatado na Figura 13, onde a equipe é formada por:

- **Gestor do Projeto (GP):** responsável direto em coordenar as atividades e certificar-se do bom andamento do projeto;
- **Analista de Modelagem (AM):** responsável direto pela criação dos modelos conceituais;
- **Estatístico (EST):** responsável direto pela coleta de dados e análise dos dados de entrada e saída;
- **Programador (PRG):** responsável direto pela transcrição do modelo conceitual no ambiente de simulação escolhido.

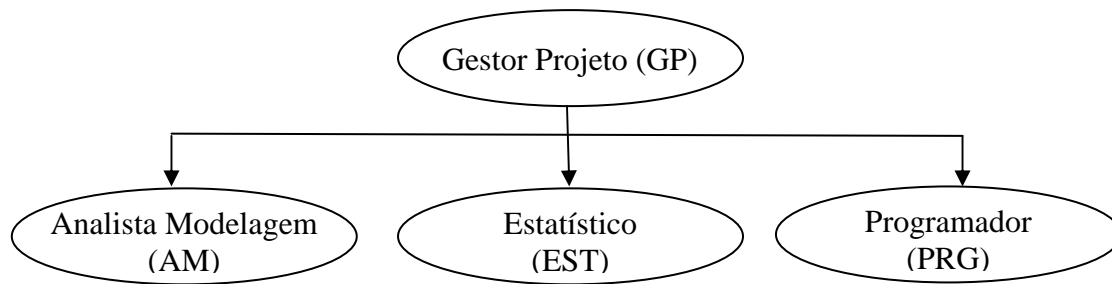


Figura 13: Organograma de uma equipe de simulação (GEORGES, 2005).

No entanto a equipe que trabalhará com os projetos de simulação deve estar capacitada para essa atividade.

5.1.2. Sistemas da manufatura

De acordo com Askin et al., (1993), a responsabilidade do gerenciamento da manufatura é estabelecer prioridades e objetivos, e monitorar o desempenho, sendo que, o engenheiro de manufatura é responsável por determinar a melhor forma de utilizar os insumos disponíveis de mão-de-obra, tecnologia, os ativos, energia, materiais e informações para atingir os objetivos, caracterizando assim o sistema de manufatura.

A Figura 14 ilustra graficamente um sistema de manufatura, sendo um sistema aberto, com sinergia com o ambiente ao seu redor, sendo que alterações tanto no sistema quanto no ambiente afetam ambos. O mesmo possui subsistemas, alimentado por entradas, efetuando transformações e produzindo saídas, possui ainda um mecanismo de controle e retro-alimentação para sustentar os objetivos.

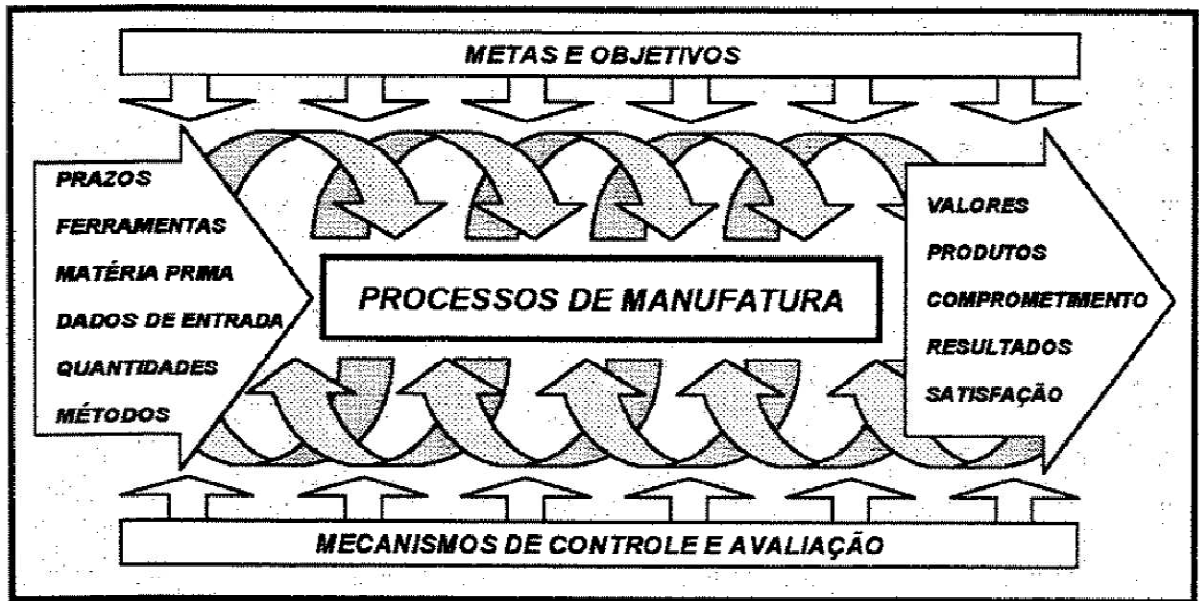


Figura 14: Sistema de Manufatura (Agostinho, 1995 apud GEORGES, 2001)

Manufatura pode ser classificada como de partes discretas ou processos contínuos. Manufatura de partes discretas é caracterizada por peças individuais como por exemplo fabricação de placas de circuito impresso ou bloco do motor. Em relação a processos contínuos, são processos industriais onde existe um fluxo de materiais, os exemplos mais comuns são refinaria de petróleo e indústria química. (ASKIN et al., 1993).

Estes mesmos autores, dividem o sistema de manufatura em cinco funções inter-relacionadas:

- **Desenvolvimento do produto:** responsável por assimilar as necessidades dos consumidores e desenvolver o produto que possa ser proveitosamente manufaturado, satisfazendo o desejo dos clientes. Através dos avanços tecnológicos, os projetos são realizados em sistemas de CAD em 3D e suas propriedades podem ser analisadas utilizando equações matemáticas.
- **Planejamento de processos:** responsável por especificar a sequência de operações que deve ser seguida para transformar a matéria-prima em peças. Este planejamento requer um profundo conhecimento da disponibilidade e capacidade das operações de produção e as necessidades funcionais especificada pelo engenheiro de produto, ou seja, seleção das máquinas e ferramentas adequadas para atingir as especificações de tolerâncias.

- **Operações de manufatura:** são geralmente de natureza da fabricação de peça ou montagem de peça. Responsável pela cadeia produtiva, acompanhando o fluxo do material pelo sistema, analisando como os processos estão ligados para obter o volume desejado de produção no nível de qualidade pretendido.
- **Layout do fluxo de material/recursos e instalações:** onde o fluxo de material está relacionado ao manuseio das peças dentro da fábrica e o *layout* dos recursos e instalações estão relacionados ao espaço físico do processo de produção e às necessidades da produção como ar comprimido, luz, energia e condições do ambiente (aquecimento, ventilação e ar condicionado) .
- **Planejamento da produção:** agendamento e controle, é responsável por combinar as informações de demanda do mercado, capacidade de produção e o nível do giro de estoque para determinar a produção desejada pela família de produto por um médio e longo prazo, constituindo assim em um componente importante para o sistema de manufatura.

O fluxo de informação é o guarda-chuva que guia as cinco funções e supervisiona seu rumo e mede em conformidade com os objetivos da corporação.

Desta maneira o conhecimento dos sistemas de manufatura se faz necessário para projetá-lo de melhor maneira possível e prognosticar seu desempenho para atingir o plano de produção.

5.1.3. Teoria das Filas

Existem várias técnicas de modelagem, como podemos citar a Rede de Petri, uma técnica de modelagem que permite a representação de sistemas, utilizando como alicerce uma forte base matemática. Essa técnica possui a particularidade de permitir modelar sistema paralelos, concorrentes, assíncronos não-determinísticos. (Francês, 2003)

Porém a simulação de eventos discretos comumente utilizada nos *softwares* de simulação se baseia no conceito da Teoria das Filas, composta por uma fila e tempo de serviço, observável em qualquer processo de manufatura. Como por exemplo, as filas são os estoques de peças aguardando para serem processados nas máquinas num determinado tempo de serviço. (GEORGES, 2005)

A Figura 15 ilustra a estrutura básica de um modelo de fila.

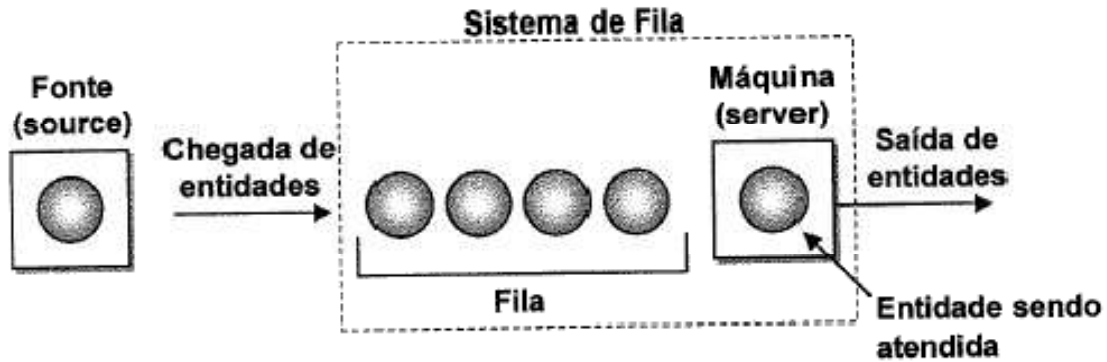


Figura 15: Estrutura básica de um modelo de Fila (GEORGES, 2005).

Segundo Banks, et al., (2001) um sistema simples de filas consiste na chegada de clientes de tempo em tempo a um servidor para serem atendidos e depois sair do sistema. Tendo como estrutura básica:

- Fonte, origem que gera os clientes.
- Clientes, são quaisquer entidades que solicitem serviços do sistema, pode ser pessoas, peças, máquinas, caminhões, aviões, paciente, entre outros..
- Servidores, são os recursos do sistema que fornecem o atendimento aos clientes, pode ser recepcionista, mecânicos, máquinas, etc.
- Filas, na qual os clientes são submetidos ao chegarem no sistema de fila.

Os modelos de filas, podem ser resolvidos matematicamente ou analisado através da simulação, são excelentes ferramentas para projetos de novos sistemas de filas e também para identificação de oportunidades de melhorias em sistemas existentes, fornecendo medidas de desempenho como percentual de utilização do servidor, comprimento das filas ou tempo de espera das entidades. Estas medidas podem ser estimadas em função dos parâmetros de entrada do sistema, como a taxa de chegada das entidades, as suas demandas por serviços, o tempo e o número de atendimento e configuração dos servidores. Uma vez que algumas dessas entradas estão sobre controle da administração do sistema, um modelo de fila ajuda a identificar a maneira mais adequada de utilizar os recursos existentes de forma a alcançar o melhor desempenho possível.

Modelos relativamente mais simples podem ter solução matemática utilizando técnicas de Teoria de Filas, o que representa um esforço significativamente menor do que com a utilização de

simulação. Todavia, modelos mais realistas e complexos exigem a análise de um histórico artificial gerado por modelos executados (BANKS, et al., 2001).

Alguns elementos importantes de um sistema de filas são descritos a seguir:

- **População:** conjunto de clientes em potencial do sistema. A população pode ser finita ou infinita.
- **Capacidade:** quantidade máxima de clientes no sistema, em atendimento ou em fila. Esta capacidade também pode ser considerada finita ou infinita.
- **Processo de Chegada:** sistemática que indica o intervalo entre as chegadas subsequentes dos clientes no sistema. As chegadas podem ser agendadas ou em instantes aleatórios, assim como os clientes podem chegar um por vez, ou em grupos de tamanho constante ou aleatório. Para sistemas de população finita existe um parâmetro denominado tempo de ciclo, que representa o intervalo entre o final do atendimento do cliente e a sua próxima solicitação por serviço, ou seja, da sua saída do sistema até o seu retorno. Este parâmetro pode também ser constante ou aleatório, caso em que são aplicadas distribuições de probabilidade.
- **Comportamento da Fila:** Ações dos clientes quando à espera por atendimento em uma fila. Eles podem desistir de entrar no sistema por considerar a fila muito longa, deixar a fila por perceber que a mesma está se movendo muito devagar ou trocar constantemente de uma fila para outra na qual acredita chegará mais rapidamente o momento de seu atendimento.
- **Disciplina da Fila:** Ordem lógica que determina qual é a sequência de atendimento dos clientes em fila. As mais comuns são:
 - FIFO – primeiro cliente que chega é o primeiro a ser atendido;
 - LIFO – último que chega é o primeiro a ser atendido;
 - SIRO – atendimento aleatório;
 - SPT – primeiro que possui o tempo de processo mais curto;
 - PR – de acordo com a prioridade de atendimento.
- **Tempo de Atendimento:** Intervalo de tempo entre o início e o término da prestação de serviço ao cliente. Pode ser constante, variar aleatoriamente ou em função de outras variáveis, como tipo de cliente, horário ou comprimento da fila.

- **Mecanismo de Atendimento:** Número e configuração dos servidores. Os sistemas de filas podem possuir um, múltiplos ou até mesmo infinitos servidores. Estes podem estar em seqüência ou paralelo.

Kendall, 1953 apud Banks, et al., (2001) representa um modelo de fila pela notação $A / B / c / N / K$, onde:

- A – representa a distribuição de tempo entre chegadas (determinístico ou estocástico);
- B – representa a distribuição de tempo entre atendimentos (determinístico ou estocástico);
- C – representa o número de servidores;
- N – representa a capacidade do sistema;
- K – representa o tamanho da população ou a disciplina da fila (FIFO, LIFO, SIRO, SPT ou PR)

Os símbolos A e B são representados normalmente pelas letras M (distribuição exponencial ou Markov), D (constante ou determinística), E (distribuição Erlang), H (distribuição hiperexponencial) e G (distribuição qualquer).

Georges (2005) considera a teoria das filas como um “tijolo básico” de construção de modelos de simulação, pois todos os modelos de simulação de sistema de evento discreto apresentam fontes que geram entidades, postos de atendimento que processam a entidade aguardando em filas. Sendo que os modelos de simulação são compostos de diversos “tijolos básicos”, agrupados de modo apropriado a fim de construir o modelo desejado, em geral complexo e grande. Ainda afirma que saber agrupar tais “tijolos básicos” de modo a formar o modelo constitui em um grande desafio, pois a tarefa de construir um modelo o mais simples possível, mas suficientemente complexo para representar as propriedades elementares do sistema de interesse é, para muitos autores consagrados, mais uma arte do que uma ciência.

5.1.4. Disponibilidade dos dados de entrada

Esse tópico é muito interessante, pois a coleta de dados é uma das maiores atividades na solução dos problemas reais. Também, é um dos problemas mais importante e difícil na simulação de evento discretos, pois mesmo quando os dados estão disponíveis, eles raramente estão gravados no formato que é diretamente utilizável para dados de entrada de simulação.

Coleta de dados de entrada e análise requer tempo e comprometimento das pessoas envolvidas no projeto de simulação. (BANKS et AL, 2001)

Todos os modelos necessitam de dados de entrada confiáveis, e os mesmos podem ser extraídos do projeto do produto, planos de processo e das informações do sistema. Como uma questão prática, isso muitas vezes não é verdadeiro. Múltiplas fontes de dados podem precisar ser usadas e as incoerências entre as fontes de dados podem precisar ser corrigidas. A falta de dados pode causar um modelo a ser modificado ou premissas de modelagem diferentes a serem feitas. Procedimento padrão para coleta de dados de entrada de um modelo não existe. Todavia, a obtenção de dados confiáveis é crucial para o sucesso da modelagem. (ASKIN, et al., 1993)

Segundo Pidd (1996), um erro comum as pessoas ao aprender sobre modelagem, é insistir que o progresso não pode ser feito a menos que haja alguns dados (ou mais) disponíveis. Eles acreditam que a investigação dos dados irá fornecer algumas pistas que irá estender o seu entendimento. Isso pode ser um erro, apesar de análise exploratória de dados ser uma técnica muito valiosa, mas não substitui um pensamento cuidadoso e uma análise.

O modelo deve conduzir a coleta de dados e não vice-versa. Isto significa que o analista deve tentar desenvolver algumas idéias do modelo e seus parâmetros e deste deve pensar o tipo de dados que podem ser necessários. Se as circunstâncias permitirem, então a melhor abordagem seria a de desenvolver um modelo simples e, em seguida, coletar dados para parametrizar e testá-lo.

Infelizmente, em algumas situações um estudo de simulação deve ser realizado quando não tem tempo ou recurso para coletar os dados de entrada para fundamentar o modelo de simulação. Quando isso ocorre, o analista deve usar todas as informações disponíveis, tais como as especificações do fabricante e opiniões de especialistas, para construir o modelo de simulação. Quando o modelo de simulação é desenvolvido sem os dados de entrada, é importante uma análise de sensibilidade dos resultados para os modelos escolhidos. (BANKS et AL, 2001)

Dados de entrada são necessários para três finalidades: para construção do modelo conceitual, para validação do modelo e para realização de experimentos com o modelo validado. (SARGENT, 2010)

Assim, para garantir modelos de simulação coerentes ao sistema real e com tempo de desenvolvimento reduzido, os dados de entrada devem ser confiáveis e de fácil acesso. Portanto, é necessário que o sistema de manufatura seja monitorado e controlado. Essa atividade deve ser

estabelecida pelo corpo gerencial do mesmo, determinando os indicadores necessários para essa atividade. Pode-se citar como exemplo o indicador de capacidade de uma linha de produção, para alimentar esse indicador o engenheiro responsável, necessitará manter atualizados os tempos de processos, cálculo de eficiência da linha, quantidade de mão-de-obra, entre outros, ou seja, todos os meios para obtenção do indicador serão atualizados. Porém essa atividade é difícil e requer disciplina de todos envolvidos.

5.1.5. Tratamento dos dados de entrada

De acordo com Georges (2005), o tratamento dos dados de entrada constitui em uma parte essencial para garantir um resultado coerente da simulação, sendo que a estatística é a ferramenta para sua análise e decisão sobre as informações que alimentarão o modelo da simulação.

Esse processo de tratamento dos dados consiste em algumas etapas:

- Estatística Descritiva: representa a fase em que é extraída as medidas de posição (média, mediana, moda, máximo, mínimo, etc) e de dispersão (variância, amplitude, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, etc) da variável aleatória em estudo;
- Histograma: representação gráfica da população coletada, muito útil na identificação o formato da distribuição estatística;
- Teste de Aderência: conhecido também por teste de hipótese, identifica se a sequência de números pode ser considerada aleatória e se os dados de entrada podem ser considerados provenientes de uma dada distribuição. Existem cinco tipos de teste:
 - Teste de frequência: é um teste em que se compara a frequência dos valores obtidos empiricamente com valores obtidos teoricamente (valores esperados). Os teste mais famosos são: Teste Qui-quadrado, Teste Kolmogorov-Smirnov e o Teste Anderson-Darling;
 - Teste de Corrida: é um teste em que se analisa sub seqüências estritamente crescentes e decrescentes, ou seqüências estritamente acima ou abaixo da média pela comparação dos valores atuais em relação aos valores esperados.
 - Teste de Auto-correlação: também conhecido como teste da dependência linear. Esse teste busca por alguma forma de correlação na seqüência testada.

- Teste do Intervalo: conta o número de dígitos que aparece entre repetições de um particular dígito e usa o teste Kolmogorov-Smirnov para comparar a frequência obtida com a frequência esperada.
- Teste Poker: baseado no jogo de cartas homônimo, os números são tratados em grupos e é comparada a frequência que números repetidos aparecem com a frequência esperada.
- Ajuste de Curvas: esse processo consiste em encontrar a melhor distribuição de probabilidade que se ajusta a uma coleção de dados obtidos empiricamente. O teste de ajuste de curvas é dado em função do *p-valor*, definido como uma estatística do teste que mede o menor nível de significância em que a hipótese nula é rejeitada com base nos dados experimentais.

De acordo com Georges (2005) para não comprometer toda a simulação, a coleta de dados não deve ser conduzida de maneira equivocada, pois a coleção de dados obtidos não refletirá o real comportamento do sistema e, conseqüentemente, a distribuição de probabilidade e seus parâmetros poderão não estar corretos e a simulação será alimentada por dados falsos.

Chwif e Medina (2006) afirmam que todo levantamento de dados está sujeito a valores não usuais conhecidos como *outliers*. Os motivos do seu surgimento são:

- Erro na coleta de dados: é o mais comum normalmente quando o levantamento de dados é feito por meio manual. Exemplos são: falhas em equipamentos de coleta de dados, problemas na conversão de arquivos, máquinas que suspendem o serviço temporariamente, entre outros. Quando ocorre esse tipo de *outlier* o mais correto é retirá-lo da amostra.
- Eventos raros: este é o tipo de *outlier* mais difícil de se lidar. Nada impede que situações totalmente atípicas ocorram na coleta de dados. Alguns exemplos:
 - Um dia de temperatura negativa no verão da cidade do Rio de Janeiro;
 - Um tempo de execução de um operador ser muito curto em relação aos melhores desempenhos obtidos naquela tarefa;
 - Um tempo de viagem de um caminhão de entregas na cidade de São Paulo, durante o horário de *rush*, ser muito menor do que fora deste horário.

Os mesmos autores ainda concluem que esses *outliers* são um problema, pois afetam os resultados do estudo distorcendo as estimativas, os níveis de significância dos testes estatísticos e

levando a conclusões equivocadas. Normalmente, deve-se retirar da amostra todos os *outliers* encontrados, porém nem sempre é o mais correto, às vezes, se trata de um valor que não podemos desprezar ou de uma característica própria do fenômeno. Assim o bom senso e o objetivo final do estudo de simulação são aspectos que devem ser levados em considerações neste momento (CHWIF, et al., 2006).

Segundo Banks, et al., (2001) apesar de os *softwares* estatísticos que acompanham os *softwares* de simulação, como por exemplo ExpertFit e StatFit, são capazes de identificar a distribuição probabilística, realizar o teste de aderência e ajustar a curva automaticamente, deve ser assumido somente após uma análise pelo simulacionista, que deve utilizar os recursos gráficos para decidir se aceita ou não a distribuição encontrada pelos *softwares*. O mesmo ainda afirma que nada substitui a percepção humana, a experiência sobre o sistema e seu conhecimento prévio sobre o fenômeno, e que a escolha final é sempre do simulacionista, e não do *software* estatístico.

5.1.6. Software de simulação

Os *softwares* de simulação apesar de serem diferentes possuem como muitas características em comum, como por exemplo, interface gráfica com o usuário, animação, coleta de dados de saída automática para medir performance do sistema, dados de saída para diferentes cenários, gráfico dinâmicos durante a simulação em formato de barra, linha ou pizza. Porém alguns enfatizam desenhos 2D e 3D, enquanto outros enfatizam animação por ícone ou desenho esquemático ou fluxo de processos.

A idéia desse texto não é definir como escolher um *software*, mas apresentar alguns requisitos necessários para um *software* de simulação.

Segundo Georges (2005) divide-se os recursos em algumas classes:

- Recurso para modelagem, entre os principais recursos de modelagem estão os blocos construtores, porém existem outros recursos importantes, como: biblioteca de ícones especializados, sub-rotinas pré-programadas, construção de *templates*, programação em níveis, reuso de modelos existentes.
- Recursos para análise, classifica-se como os recursos de entrada e saídas da simulação, são: ajuste de curva, geração de variáveis e números aleatórios,

planejamento de experimentos, teste de aderências, estimação de parâmetros (teste de hipóteses e intervalos de confiança), testes de recursos gráficos diversos (histograma, box-plots, gráficos de coluna, linha e pizza), importação de dados de entrada, determinação do número de replicações, determinação do período de aquecimento (*warm-up*), ferramentas de otimização, análise de custos, entre outras ferramentas de análise.

- Recurso para animação, importar dados de entrada (figuras, desenhos em CAD, fotos, etc), criação de ícones, simulação em 2D e 3D, zoom e rotação do plano de simulação, botões de atalho na navegação pelo modelo, extensa biblioteca de ícones e componentes, permite movimento dos ícones para indicar o estado (ou então usam-se cores).
- Recurso para execução e gerenciamento das simulações, envolvem recursos como: determinação da velocidade da simulação, avanço rápido, câmera lenta, simulação sem animação, simulação passo-a-passo, pausa, *debugger* (depurador) interativo, gerenciador de cenários, controle de replicações, apresentação do estado da simulação em qualquer momento e coleta das estatísticas a qualquer momento.
- Recursos para geração de relatórios, consiste em exportar dados, criação de relatórios automáticos, geração de gráficos automáticos e criação de relatórios em formato txt e html.

Segundo Silva (2006), é fundamental a aplicação de um método para avaliação e seleção do *software* que melhor atenda o projeto de simulação com o menor custo total associado, pois existem diversos *softwares* de simulação de evento discretos com as mais variadas características e custos. O mesmo autor, apresentou um resumo dos métodos para avaliação e seleção de software de simulação de evento discreto, Tabela 2.

Tabela 2: Resumo dos métodos revisados para avaliação e seleção de softwares de simulação de evento discretos (SILVA, 2006).

Característica	Banks (1991)	Davis e Williams (1994)	Hlupic e Mann (1995)	Nikoukaran, Hlupic e Paul (1998)	Tewoldeberhan, Verbraeck, Valentin e Bardonnet (2002)
Crerios	36 (agrupados em 5 categorias)	14 (agrupados em uma única categoria)	40 (agrupados em 11 categorias)	93 (agrupados em 7 categorias)	65 (agrupados em 7 categorias)
Categorias	Entrada; Processamento; Saída; Suporte; Custo	Características gerais	Características gerais; Aspectos visuais; Codificação; Eficiência; Assistentes; Recursos para testes; Entrada/Saída; Compatibilidade; Recursos para experimentos; Ferramentas estatísticas; Características técnicas e financeiras	Fornecedor; Desenvolvimento do modelo/Entrada; Execução; Animação; Eficiência e teste; Saída; Usuário	Fornecedor; Desenvolvimento do modelo/Entrada; Execução; Animação; Eficiência e teste; Saída; Usuário
Seleção	Em 2 fases: 1º) Atribuição de pesos e pontuação 2º) Estudo detalhado para as 3 melhores opções (maior pontuação)	Em 2 fases: 1º) Seleção dos <i>softwares</i> que atendem as restrições de <i>software</i> , <i>hardware</i> e suporte local 2º) Uso do método de análise hierárquica (AHP)	Em 2 fases: 1º) Seleção dos <i>softwares</i> que atendem as características gerais 2º) Classificação segundo a prioridade atribuída aos critérios	Os autores não abordam; sugerem avaliar o método de análise hierárquica (AHP)	Em 2 fases: 1º) Atribuição de pesos e pontuação (eliminação dos <i>softwares</i> que não atendem aos critérios eliminatórios) 2º) Atribuição de pesos e pontuação (verificação de qualidade)

Como citado anteriormente, existem diferentes tipo de *software* de simulação de evento discreto no mercado e o processo de avaliação do *software* pode ser assustador. Deve-se selecionar a ferramenta que é intuitiva e fácil o uso, mas robusta o suficiente para solucionar o seu problema. Existe uma curva de aprendizado em qualquer *software* de simulação, deste modo, a experiência do time de simulação envolvido deve também ser considerada. (JURISHICA, 2010)

Carvalho, et al., (2001) afirma que a Simulação é uma ferramenta muito poderosa no auxílio à tomada de decisão, porém o seu estudo precisa ser feito de forma adequada, sendo que a escolha errada do software pode trazer problemas de gastos desnecessários e frustração nos resultados esperados.

5.2. Restrições da simulação

As vantagens são muitas em usar o estudo de Simulação, porém esse resultado exige um preparo e conhecimento do processo de utilização da ferramenta.

As principais dificuldades encontradas para utilização do software, de acordo com Carvalho, et al., (2001) são:

- Falta de conhecimento em técnicas de modelagem;
- Desconhecimento das etapas para elaboração de um estudo de Simulação;

- Dificuldade em lidar com o software;
- Falta de gente especializada na área;

Segundo Colmanetti (2001) a simulação pode se tornar ineficiente, cara e inútil, caso não realizar uma abordagem sistêmica, podendo ocasionar várias armadilhas na execução de um projeto de simulação, visto na Figura 16.

Armadilhas da Simulação
<p>Relacionadas ao processo</p> <ul style="list-style-type: none"> • Não definir claramente o projeto e manter o cliente sem informação • Não estabelecer uma base para comparações e criar expectativas não realistas • Não avaliar criteriosamente os dados de entrada • Não fornecer relatórios freqüentes e não documentar o projeto • Não interagir com o cliente • Não “vender” adequadamente os sucessos atingidos • Mudar freqüentemente de escopo • Acreditar demais nos resultados da simulação • Não revisar adequadamente o projeto durante a sua execução • Gastar mais tempo nos modelos do que nos problemas e não saber quando parar
<p>Relacionadas aos modelos</p> <ul style="list-style-type: none"> • Não validar as hipóteses do modelo • Iniciar com um modelo demasiadamente complexo • Perder de vista os aspectos de implementação • Utilizar o modelo de forma econômica • Não compreender os limites do modelo
<p>Relacionadas às pessoas</p> <ul style="list-style-type: none"> • Falta de espírito de equipe • Falta de envolvimento de pessoas chaves no processo de tomada de decisão • Falta de conhecimento do cliente/ou de alternativas ao cliente • Prover uma pequena lista de alternativas ao cliente e ter medo de defender as mudanças

Figura 16: Armadilhas da Simulação (fonte: ULGEN et al(1996) apud COLMANETTI, 2001)

As armadilhas citadas anteriormente, vão de encontro à necessidade de um desenvolvimento de modelo de simulação estruturado, sendo que o fluxo de trabalho apresentado no Capítulo 3 sendo bem executado evitaria, na maioria das vezes, que algumas das armadilhas ocorressem.

Porém Robinson e Pidd (1998, apud CHWIF, et al., 2006) reforçam que a relação “cliente-analista” é tão ou mais importante que os aspectos tecnológicos envolvidos no projeto de simulação. E os mesmos autores investigaram quais fatores que os analistas de simulação e os clientes acreditam ser os preponderantes no sucesso e no fracasso de um estudo de simulação, baseado em 338 fatores identificados, desenvolveram as dimensões abaixo:

- Modelo (velocidade, estética e facilidade de uso);
- Confiança no modelo (credibilidade);

- Disponibilidade e precisão nos dados de entrada;
- Software de simulação;
- Credibilidade do analista;
- Competência do analista;
- Profissionalismo do analista;
- Comunicação e interação do pessoal envolvido no projeto;
- Responsividade do analista (capacidade de responder ao cliente de forma adequada);
- Cliente comprometido com o projeto de simulação.

Analisando as dimensões acima, vê-se que apenas quatro são técnicas e o resto corresponde à relação cliente-analista, apresentando-se assim ser o fator determinante no sucesso do estudo de simulação.

Chwif e Medina (2006) sugere uma segunda regra, sendo a primeira a relação cliente-analista. Elaborar um primeiro projeto de simulação simples, onde as chances de sucesso é maior, e apresente os resultados utilizando animação do modelo de simulação. Pois, a simulação aumenta a credibilidade do projeto, ganhando assim aliados dentro da empresa para a continuação do mesmo. A experiência mostra que, neste momento, ao conseguir aliados o fornecimento das informações e os dados ocorre com mais rapidez e firmeza. Mais importante do que a alegria do cliente é a confiança conquistada.

Jurishica (2010) também intensifica a necessidade do apoio da gestão da empresa para executar os projetos de simulação de forma eficaz. Você pode ser um construtor de modelo e ser muito confortável com a ferramenta de simulação e os benefícios que ela proporciona, porém para utilizá-la precisará obter aprovação para o investimento em simulação dentro da empresa.

Deste modo o mesmo autor ainda propõe, em educar os gestores das áreas da empresa sobre o que é simulação e os benefícios que a mesma pode proporcionar, sendo uma tarefa muito importante, e às vezes, muito difícil. Quanto mais os gestores compreender a ferramenta, mais eles estarão dispostos a investir na iniciativa. Portanto, deve-se apresentar um plano bem estruturado sobre a implementação da ferramenta de simulação, articulando claramente o que é a simulação e suas vantagens sobre outros métodos de análises, sendo o mais importante transmitir o valor que ela pode oferecer.

Conclui-se que para evitar as armadilhas da simulação deve-se ter um grupo focado nessa atividade com apoio da gestão e o método da aplicação da mesma bem desenvolvido.

6. PARTE EXPERIMENTAL

Como estratégia de pesquisa executou-se um estudo de caso na manufatura de uma empresa do ramo da indústria de autopeças, sendo que a mesma necessita passar por uma reestruturação na manufatura para atender o aumento dos volumes de produção solicitado pelo mercado em 2011.

Esse aumento de produção ocorre devido à mudança da legislação brasileira em relação ao nível de emissões de motores diesel, mudando de EURO III para EURO IV em 2012. Entretanto, todo o produto fabricado no ano de 2011 pode ser vendido em 2012, mesmo sendo de nível de emissões diferente. Esse efeito chama-se *pre-buy*, e devido a esse fator as montadoras solicitam o máximo da capacidade de produção dos seus fornecedores. Com isso as montadoras conseguem ainda vender um produto mais barato no ano seguinte até que o novo seja inserido no mercado.

Para atender essa solicitação de aumento de capacidade, foi definida a estratégia de negócio da manufatura por **diferenciação** e a prioridade competitiva por **flexibilidade**, baseada na teoria apresentada no item 4.1.

Após essas definições foi realizado um mapeamento da manufatura para identificar os gargalos de produção. Criou-se uma matriz de decisão para auxílio na escolha da linha de produção onde foi aplicado o estudo de simulação de evento discreto.

No estudo de simulação foi realizada a modelagem da linha atual para validação do modelo de simulação e após essa validação foram elaboradas propostas de melhorias no modelo para identificar possíveis ganhos na capacidade de produção.

De maneira geral, pode-se dizer que o estudo desenvolveu-se conforme as etapas abaixo:

- Identificar a estratégia da manufatura e a prioridade competitiva da empresa em relação à linha de produção, buscando a vantagem competitiva;
- Desenvolver um modelo de simulação da linha de produção;
- Apresentar propostas de melhorias para atingir estratégia de negócio e a prioridade competitiva, através do modelo de simulação.

6.1. Identificação dos gargalos da manufatura

Realizou-se um estudo para analisar as capacidades produtivas das linhas de usinagem e da linha de montagem considerando os volumes de produção da empresa para o ano de 2011.

A Figura 17 apresenta os resultados em porcentagem da capacidade produtiva de cada linha em relação ao volume necessário de produção, ou seja, acima da linha 0% será necessária mais produção em relação à capacidade atual e abaixo da linha 0% a linha apresenta capacidade de produção.

Deste modo identificou-se que os gargalos da produção são as linhas de usinagem A e B, pois as mesmas precisam, respectivamente, de 5% e 6% a mais da capacidade produtiva atual.

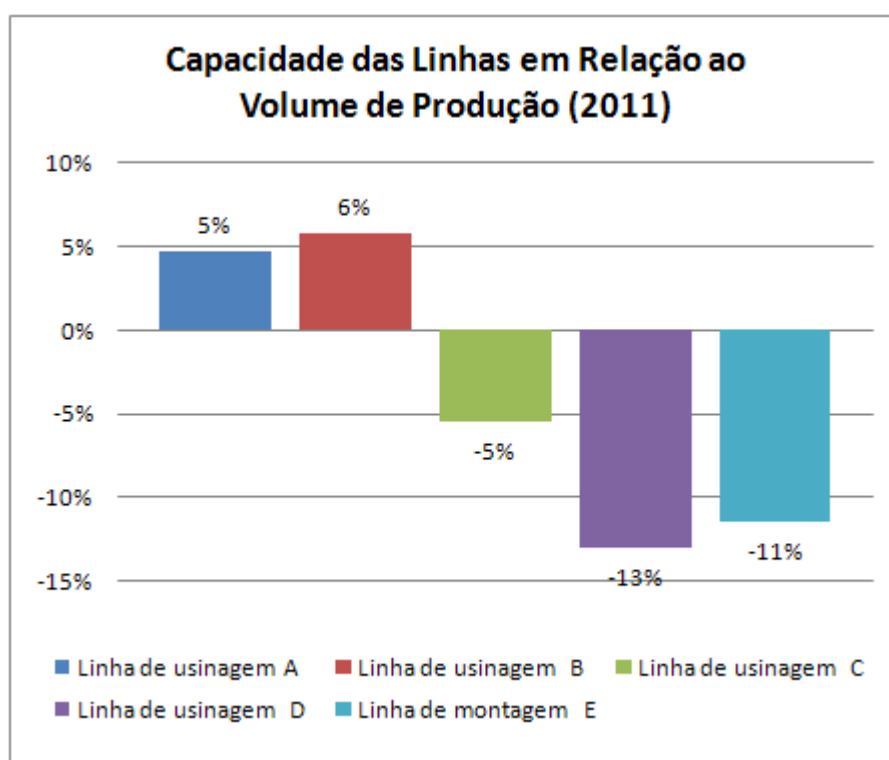


Figura 17: Gráfico de capacidade das linhas em relação ao volume de produção 2011

Porém o critério de escolha para o estudo de caso não foi apenas a capacidade de produção. Para escolha da linha de produção a ser aplicado no estudo de simulação, utilizou-se uma matriz de decisão, onde foram definidos os pesos de 1 a 5 para cada critério, sendo que cada critério recebeu uma nota de 0 a 10. Os critérios foram:

6.2. Definição do problema e dos objetivos do estudo

A linha de usinagem escolhida, identificada nesse trabalho como linha A, foi concebida na década de 80, com o conceito de linha *transfer*, pois naquela época existiam apenas dois tipos de produto, pois a variação de aplicação do produto era muito pequena e precisava-se de alta produtividade.

Com o passar dos anos foram criadas novas aplicações para esse produto chegando atualmente na quantidade de 21 tipos de produto diferentes, gerando uma necessidade de encontrar o seqüenciamento ideal para não afetar a capacidade total da produção da linha, pois dessa maneira o gargalo acaba sendo variável conforme a aplicação manufaturada.

Alguns anos atrás, foram necessários aumentar a capacidade da linha, desta maneira criou-se um projeto para realizar *retrofitting* nos equipamentos que possuíam os piores índices de MTBF e MTTR, essa ação foi para melhorar a disponibilidade da linha.

Ainda nesse mesmo projeto, realizou-se um estudo de processo, onde o objetivo principal era eliminar a variação de peça desde o início da linha, pois caso ocorresse mudança de aplicação, o tempo de resposta para abastecimento da linha de montagem e virada de linha seria mais rápido. Portanto, acrescentaram-se mais dois centros de usinagens no final da linha para absorver as operações de usinagem diferente, assim a linha trabalharia com 70% de operação comum e no final da linha determinaria uma das 21 tipos de produtos existentes. Com isso aumentou-se a capacidade em 14%, ou seja, capacidade de produção de 160 peças a uma eficiência teórica de 85%. Com o acréscimo de duas máquinas no final da linha acabou-se com a possibilidade de aplicação física da linha.

Mesmos com as modificações acima a linha não conseguia atender a eficiência estabelecida como meta de 85%, deste modo realizou-se um *kaizen* para reduzir o tempo de *setup* das máquinas, esse trabalho resultou na eliminação de *setup* na parte de desbaste da linha, aumentando um pouco a eficiência.

Ainda para manter um volume de produção para atender a montagem foi alterar o turno de operação para o sistema 2x2, ou seja, quatro grupos de operadores de máquina, trabalham a cada dois dias, doze horas, dia e noite, ou seja, trabalham dois dias e folgam dois dias, assim a linha trabalha praticamente vinte quatro horas e sete dias por semana.

Podemos observar nos fatos anteriores que essa linha de usinagem vem passando nos últimos anos por constantes intervenções para tentar aumentar e manter a capacidade produtiva. Com

necessidade atual de produção em aumentar a capacidade da linha em 5%, conforme apresentado anteriormente, faz com que analisemos com mais critérios as intervenções necessárias, pois quase todas as soluções foram saturadas, como por exemplo:

- Não há espaço para implementação de novos equipamentos;
- As máquinas do começo da linha são dedicadas para operações específicas, limitando assim a flexibilidade;
- O tempo disponível para operação é 100% utilizado com o turno 2x2;
- Não é possível executar experimentos na linha, pois não pode parar a mesma.

Portanto, para atingir objetivo de aumento de capacidade, se faz necessário a utilização da ferramenta de simulação de evento discreto, pois o sistema real apresenta uma grande complexidade, aleatoriedade e dinâmica no processo produtivo, além de existir variáveis interrelacionadas que comprometem o desempenho do sistema, sendo assim, não seria possível apenas com uma análise analítica realizar os experimentos e obter os resultados necessários.

Além do fato de não existir a possibilidade de executar experimentos no sistema real, pois necessitaria realizar intervenções na linha, ocasionado paradas e levaria muito tempo para execução, utilizando a simulação nesse sistema real pode-se realizar experimentos, onde é possível identificar:

- Sequenciamento ideal para produção;
- Necessidade de trabalhar com *Kanban* de abastecimento para linha de montagem;
- Impacto de máquina parada na linha de usinagem;
- Impacto de troca de ferramenta das máquinas;
- Necessidade de pulmão de peça intermediário para suprir a ineficiência da linha;
- Melhor utilização da mão-de-obra;

Como objetivo do estudo é o aumento de capacidade de uma linha de usinagem A, esse desafio foi encarado de duas maneiras:

- Indentificar a possibilidade de trabalhar com os dados de usinagem na característica de máxima produtividade e realizar experimentos de redução de tempo de ciclo de algumas máquinas críticas através da simulação de eventos discretos, analisando o impacto que a mesma trás para a capacidade produtiva;

- Verificar a possibilidade do aumento da eficiência da linha, mapeamento os tipos de paradas de linha e realizar experimentos diminuindo o tempo dessas paradas através da simulação de eventos discretos, analisando o impacto que a mesma trás para a capacidade produtiva;

6.3. Elaboração do modelo conceitual

O modelo conceitual foi criado a partir da análise da documentação de processo e conversa com os engenheiros de processos e operadores da linha. Após essa análise foi definido o que realmente é importante no sistema e como deve ser desenvolvido o modelo.

Como uma linha de usinagem consiste em várias máquinas convencionais e centros de usinagem interligados por sistema de movimentação para envio de peça. Foi elaborado um modelo conceitual das operações de usinagem com máquina convencional e com centro de usinagem (máquina CNC), Figura 18. Representando as características fundamentais de processo, também considerando o sistema de movimentação e os meios para que a ocorra à operação, sendo a base para o desenvolvimento computacional.

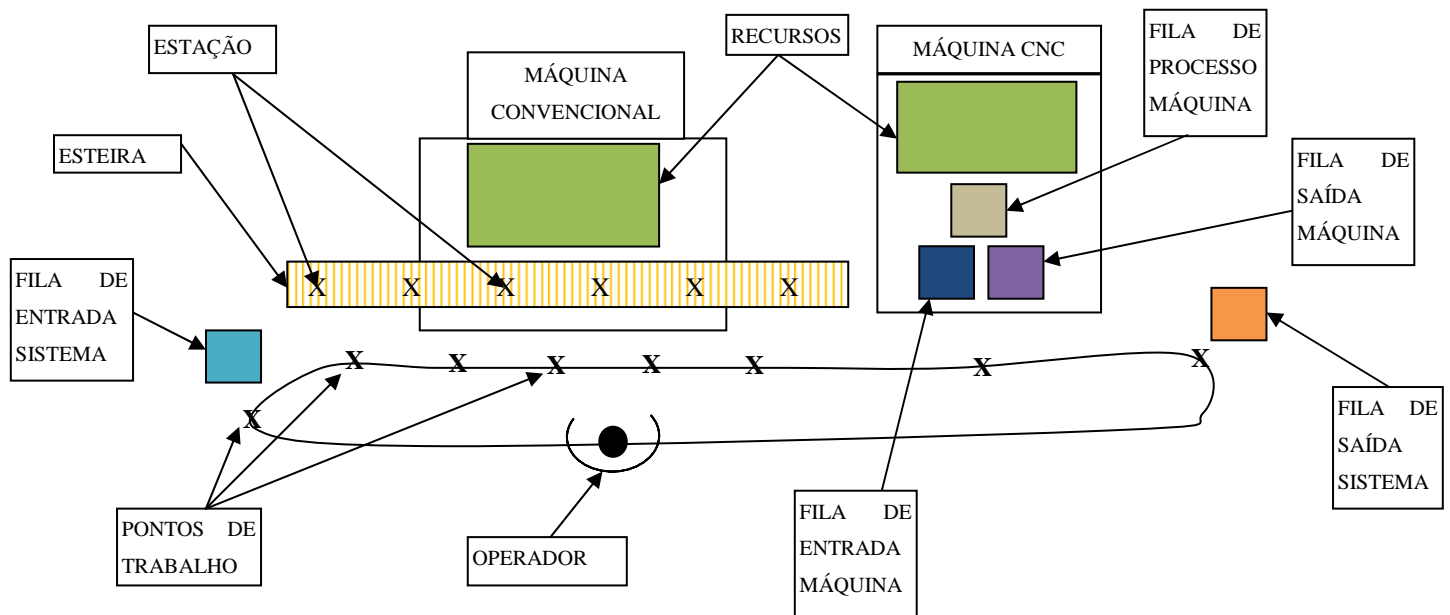


Figura 18: Modelo conceitual da linha de usinagem A

A linha tem uma fila de entrada do sistema para gerar a peça. Nessa fila de entrada é onde se determina o seqüenciamento da produção que determina o tipo e quantidade da peça a ser produzida.

Toda a movimentação de peça é feita pelo operador, considerando também a movimentação na esteira, pois a mesma não é tracionada. Esse movimento será representado pelo operador carregando a peça, conseguindo assim contabilizar a utilização da mão-de-obra. Portanto o operador foi configurado como se fosse um recurso de transporte, para isso precisa gerar pontos de trabalho para pegar as peças.

A esteira tem pontos que são considerados estações. Como a esteira passa pela máquina convencional essa estações funcionam também como fila de processo. Já na máquina CNC, precisou-se gerar fila de entrada, processo e saída para simular a troca de *pallet*. Para todas as máquinas foram determinadas as variáveis básicas de entrada que são:

- Variável para tempo de ciclo;
- Variável para set-up de máquina;
- Variável para MTBF/MTTR;
- Variáveis de troca de ferramenta.

Também foram criadas as variáveis de saída, consideradas as respostas do sistema:

- Variável produção média diária;
- Variável produção média diária por hora;
- Variável tempo de atravessamento da linha;
- Variável tempo médio de produção por peça;
- Variável de total de peça produzida.

As máquinas foram representadas por recursos, os quais têm três tipos de situação:

- Ocupado, representado pela cor verde;
- Ocioso, representado pela cor azul;
- Quebrado, representado pela cor vermelha;
- Troca de ferramenta, representada pela cor laranja;
- Parada de processo, representada pela cor roxa;

As peças, chamada de carga no modelo, foram representadas por quatro tipos: A, B, C e D.

Nessa fase do modelo conceitual foram realizados os estudos para executar as duas maneiras de aumento de capacidade.

Na primeira análise, onde se pretende reduzir o tempo de ciclo trabalhando com os dados de usinagem na característica de máxima produtividade, foram realizadas reuniões com a produção, engenharia de processos e manutenção para avaliar o sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação das máquinas críticas e requisitos de qualidade do produto.

Na segunda análise avaliou-se a influência das variáveis de troca de ferramenta e quebra de máquina na capacidade de produção da linha.

As duas variáveis foram definidas através do levantamento dos registros de parada de linha, no período de fevereiro de 2010 a fevereiro de 2011. Os registros de parada de linha são coletados por um sistema de gerenciamento de eficiência da linha, chamado PCP Master, o mesmo controla as paradas de processo automaticamente, esse sistema está instalado nas duas máquinas gargalo, 172 e 447. Quando ocorre a parada o operador deve registrar o código da parada em um painel instalado na máquina que faz parte desse sistema.

A Figura 19 e 20 apresenta o gráfico de parada das máquinas 172 e 447 respectivamente. A parada por fluxo significa falta de peça na máquina, ou seja, parou porque não chegou peça da operação anterior. Apesar de a mesma representar o maior tempo, não foi avaliado nesse modelo, pois é considerada uma variável de saída, consequência das ocorrências do sistema.



Figura 19: Gráfico de parada das máquinas 172

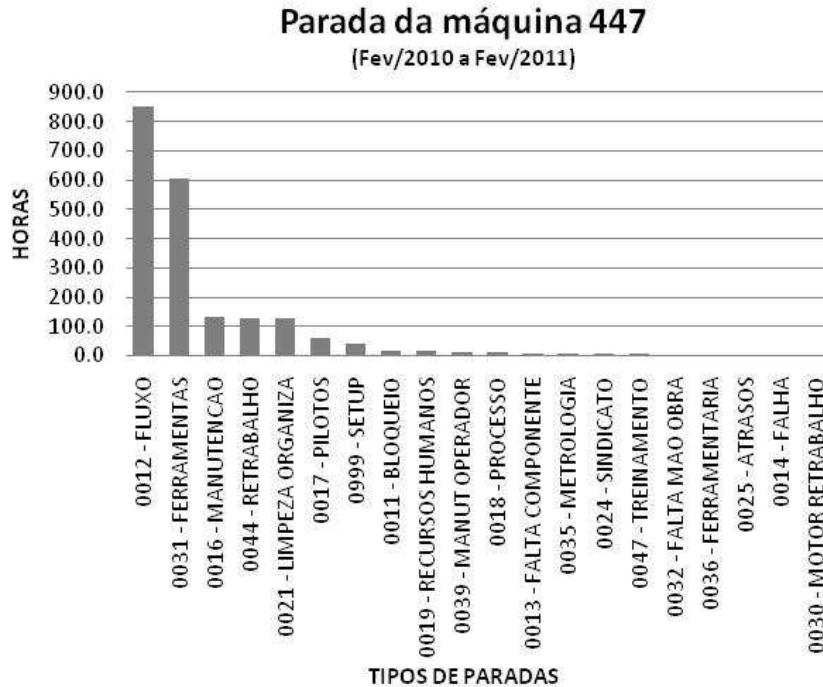


Figura 20: Gráfico de parada das máquinas 447

6.4. Coleta e validação dos dados de entrada

Os dados foram adquiridos através de coleta realizada com o suporte da produção, do grupo técnico da linha de usinagem A e da área de sistema de manufatura.

O levantamento dos dados de entrada do modelo, ou seja, os dados necessários para construção do modelo envolveram a avaliação das seguintes informações: *layout*, fluxo de processo, tipos de aplicação da peça, tempos de ciclo, disponibilidade das máquinas (MTBF / MTTR), capacidade instalada, turno de trabalho, quantidade de mão-de-obra por máquina e troca de ferramentas. Todas essas informações se fazem necessárias para análise do que é realmente importante no sistema e assim aplicar ao modelo.

A área de Sistema de Manufatura dentro da empresa, gerencia todos os indicadores da fábrica e dados de capacidade. Ao monitorar as informações da linha através da intranet, obriga os responsáveis (grupo técnico) a manter sempre atualizada tais informações. Esse controle de informação ajudou muito no desenvolvimento do projeto, pois não se perdeu muito tempo na coleta de dados, uma fase demorada em um projeto de simulação.

Pode-se considerar essa fase do desenvolvimento do projeto como uma restrição, pois se a informação demorasse a ser obtida ou desatualizada, o desenvolvimento iria entrar na morosidade citada anteriormente.

A Figura 21 representa o fluxograma do processo, indicando as etapas de operação, pontos de inspeção e meios de movimentação da peça, explicado pela legenda no canto superior direito da figura.

A Figura 22 representa o *layout* da linha de usinagem A, as setas em vermelho representa o fluxo da peça no decorrer da linha. A parte hachurada em verde representa as operações de desbaste da peça, onde praticamente não possui nenhum *setup*, já a hachura amarela representa as operações de acabamento, nessa etapa a peça começa a definir sua aplicação.

• Fluxograma:

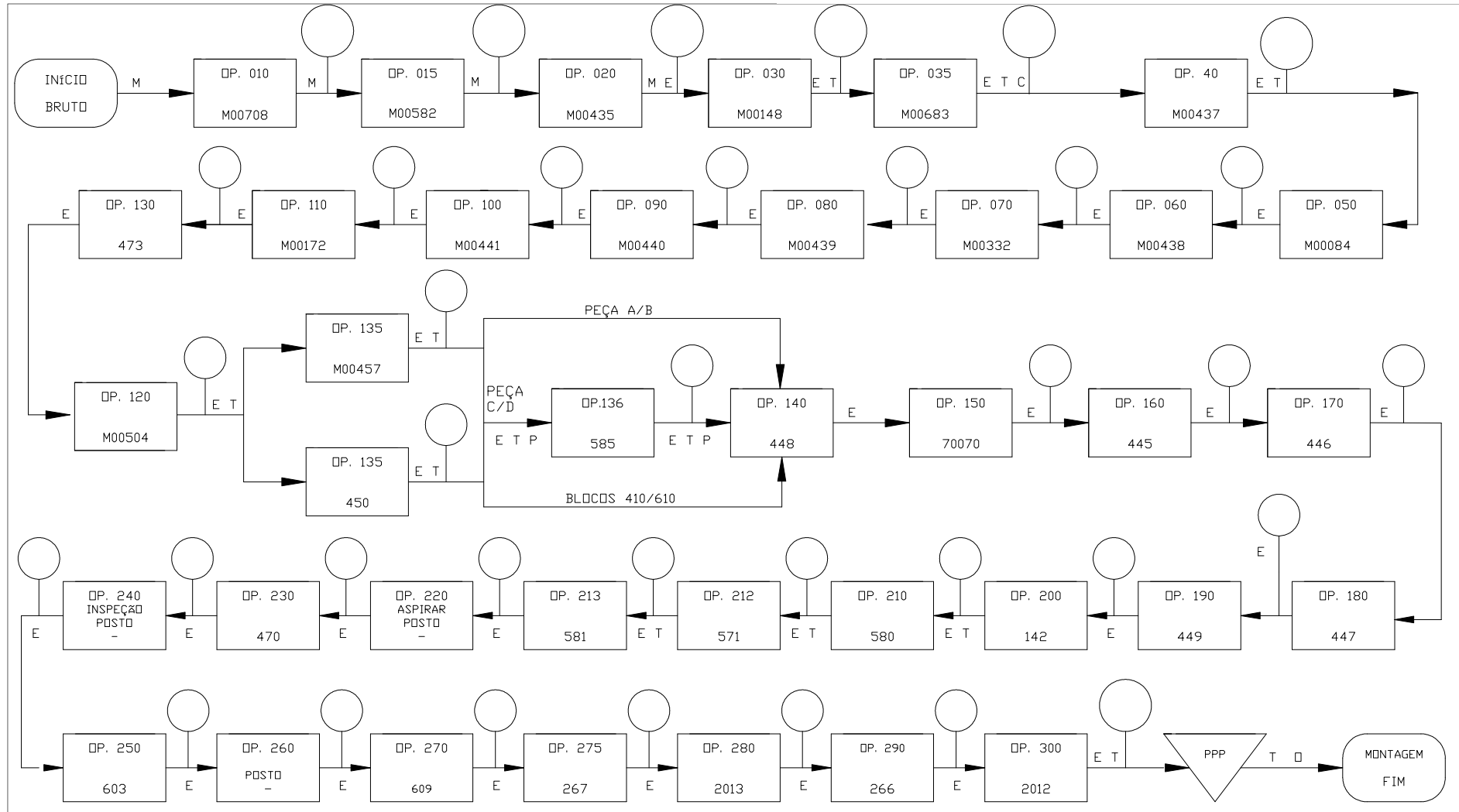


Figura 21: Fluxograma de processo

- Layout e fluxo do processo:

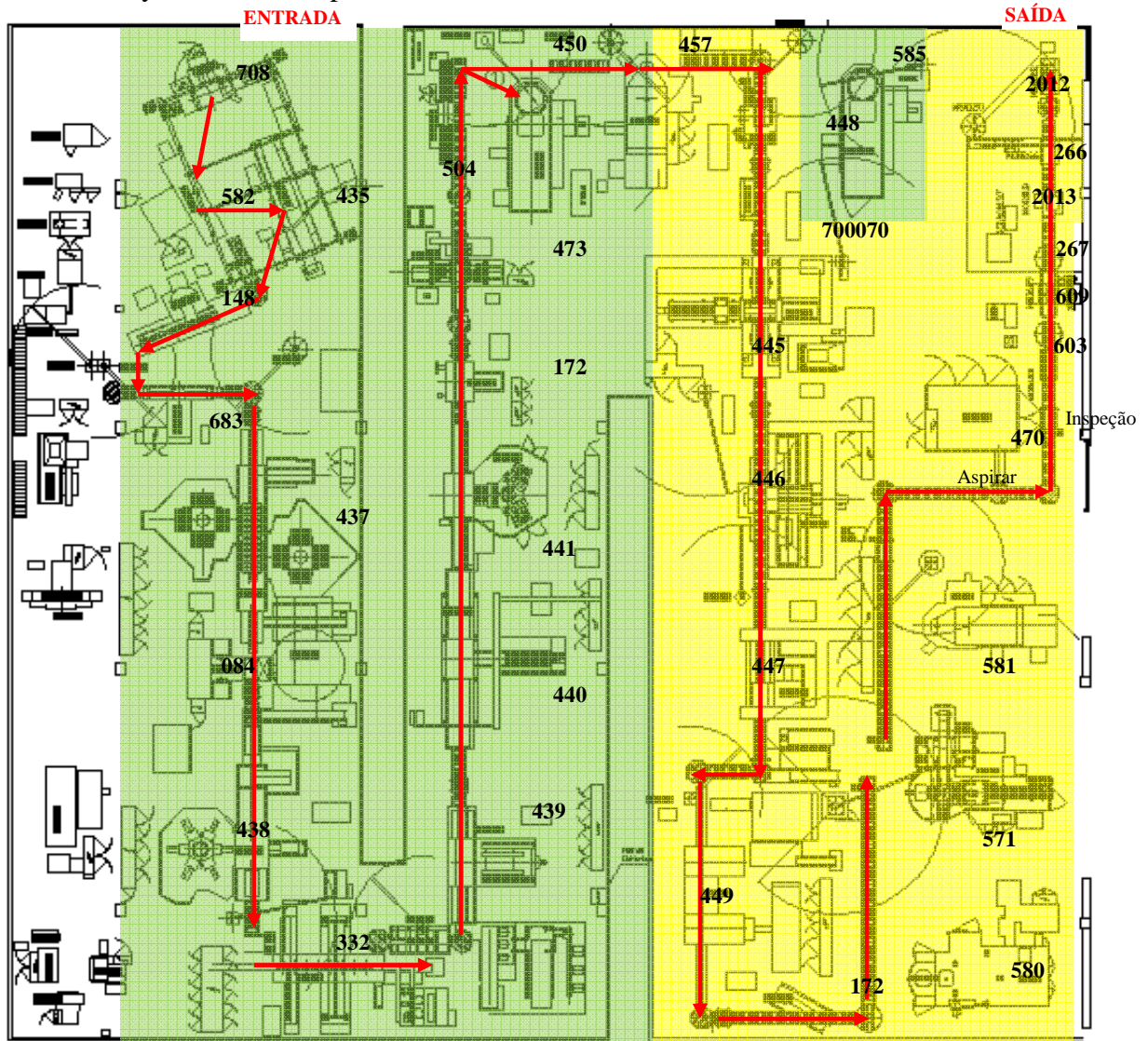


Figura 22: Layout da linha de usinagem A e fluxo da peça

- Turno de trabalho:

O turno de trabalho utilizado atualmente na linha de usinagem A, é um turno 2x2, onde é possível conseguir utilizar o máximo tempo disponível sem a necessidade de gastar com horas extras, porém necessita de 4 equipes que trabalham doze horas dois dias e folgam dois dias. Na sequência deste texto segue a Tabela 4, tempo disponível por dia com as concessões.

Tabela 4: Tempo disponível por dia

Regime de trabalho	2x2
Tempo disponível por dia (min)	1440
Concessões por turno (min)	
Refeição (min)	60
Ginástica Laboral (min)	10
Reunião (min)	10
Limpeza (min)	10
Lanche (min)	15
Total	105
Tempo disponível por dia menos as concessões (TPC) (min)	1335

- Overall Equipment Effectiveness (OEE):

Para o modelo foi extraído o OEE calculado automaticamente pelo PCP Master, *software* de gerenciamento de eficiência da linha. O cálculo é realizado conforme Figura 23, considerado portanto com o OEE de 75%.

Deste modo o tempo disponível com OEE (TPO) para essa linha é:

$$\text{TPO} = \text{TPC} * \text{OEE} = 1335 * 0,75 = 1001,25 \text{ minutos}$$

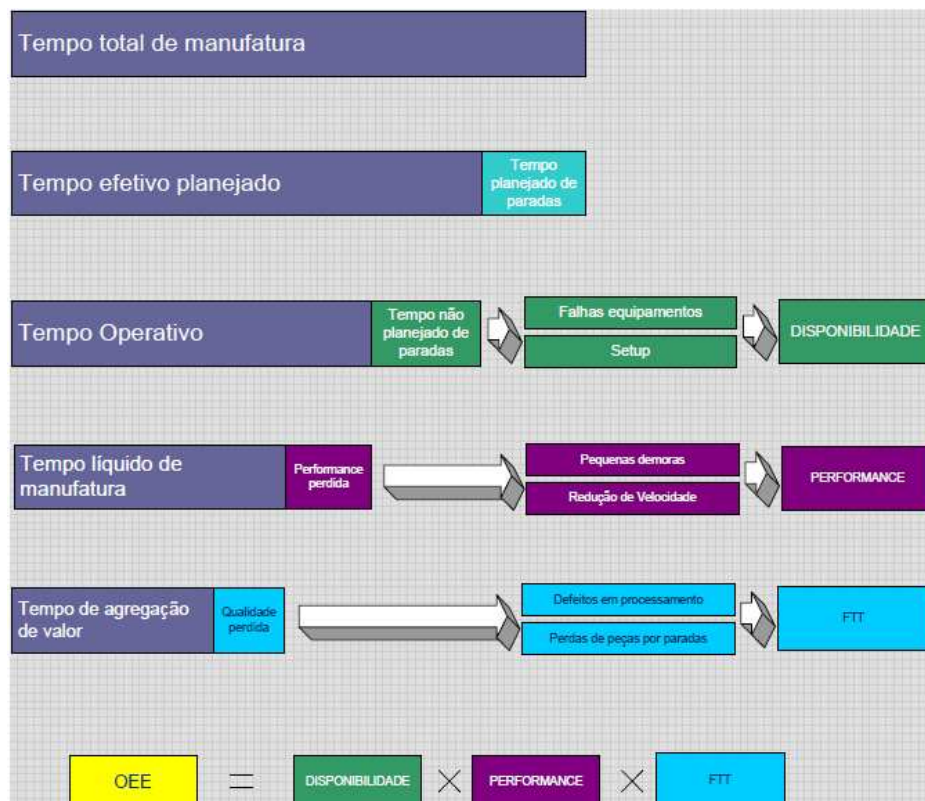


Figura 23: Representação dos elementos do OEE (LUCERO, 2006)

- Tipos de aplicação de peça:

A linha de usinagem A possui 21 aplicações de peças, porém as mesmas podem ser subdivididas em 4 grupos, pois possuem pequenas variações entre elas não impactando no modelo e minimizando esforços de programação e complexidade do modelo. A linha é abastecida em lote com 1600 peças, equivalente a aproximadamente dez dias de produção, são divididas conforme Tabela 5.

Tabela 5: Tipo de aplicação de peça

Peça	Necessidade	Quantidade
Tipo A	18.50%	296
Tipo B	16.70%	267
Tipo C	32.70%	523
Tipo D	32.10%	514

- Tempo de ciclo por aplicação de peça indicado na Tabela 6.

Tabela 6: Tempo de ciclo por aplicação

Operações de desbaste da linha de usinagem							Operações de acabamento da linha de usinagem						
Máq.	Operação	Tipos peças				Média Ponderada	Máq.	Operação	Tipos peças				Média Ponderada
		A	B	C	D				A	B	C	D	
708	10	1.60	1.60	1.60	1.60	1.60	448	140	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10
582	15	3.50	3.50	3.50	3.50	3.50	700070	150	3.90	3.90	3.90	3.90	3.90
435	20	4.10	5.15	4.10	5.15	4.61	445	160	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10
148	30	5.50	5.50	5.50	5.50	5.50	446	170	0.00	3.30	0.00	3.30	3.30
683	35	4.40	4.40	4.40	4.40	4.40	447	180	6.40	6.40	6.40	6.40	6.40
437	40	5.30	5.30	5.30	5.30	5.30	449	190	4.10	4.10	4.10	4.10	4.10
84	50	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50	142	200	3.10	3.10	3.10	3.10	3.10
438	60	4.30	4.30	4.30	4.30	4.30	580	210	5.10	5.10	5.10	5.10	5.10
332	70	4.20	4.20	4.20	4.20	4.20	571	212	4.57	5.30	6.59	5.90	5.78
439	80	1.80	1.80	1.80	1.80	1.80	581	213	5.53	6.09	6.26	6.55	6.19
440	90	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	Aspirar	220	4.70	4.70	4.70	4.70	4.70
441	100	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	470	230	4.50	4.50	4.50	4.50	4.50
172	110	4.94	6.53	4.94	6.53	5.72	Controle	240	4.19	4.19	4.19	4.19	4.19
504	120	3.29	3.29	3.29	3.29	3.29	Gravação	250	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
473	130	3.20	3.20	3.20	3.20	3.20	M266	260	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
450 / 457	135	4.93	4.93	4.93	4.93	2.47	P270	270	3.22	3.22	3.22	3.22	3.22
585	136	0.00	0.00	4.70	4.70	4.70	M603	280	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16
							609	290	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
							2012	300	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00

Operação gargalo do desbaste e acabamento da linha de usinagem

A média ponderada significa o tempo de ciclo com a influência do percentual do tipo de aplicação de peça, desta modo é possível determinar o gargalo correto com a influência do tipo de peça, abaixo segue um exemplo do cálculo:

Tempo de ciclo ponderado máquina 172 = (Tempo de ciclo peça A * % tipo de peça A)+(Tempo de ciclo peça B * % tipo de peça B)+ (Tempo de ciclo peça C * % tipo de peçaC)+ (Tempo de ciclo peça D * % tipo de peça D)

Tempo de ciclo ponderado máquina 172 = (4,94*0,18) + (6,53*0,167) + (4,94*0,327) + (6,53*0,321) = 5,72 minutos

- Mão-de-obra por máquina indicada na Tabela 7:

Tabela 7: Número de operadores por máquina

Posto/Máq.	Operação	MOD
Máq. 708/582/435	10/15/20	2
Máq. 148	30	1
Máq. 683	35	1
Máq. 437/084	40/50	1
Máq. 438/332	60/70	1
Máq. 439/440	80/90	1
Máq. 441/172	100/110	1
Máq. 473/504	130/120	1
Máq. 450	135	1
Máq. 457	135	1
Máq. 585	136	1
Máq. 448/700070	140/150	1
Máq. 445	160	1
Máq. 446	170	1
Máq. 447	180	1
Máq. 449	190	1
Máq. 142	200	1
Máq. 580	210	1
Máq. 571	212	1
Máq. 581	213	1
Máq. Sopro	220	1
Máq. 470	220	1
Máq. Controle	230	1
Máq. Gravação	250	1
Máq. 609	270	1
Máq. 2013	280	1
Máq. 266	290	1
Máq. 2012	300	2
Operadores Diretos		30
Volante / Suporte		2
Total Geral		32

- Capacidade Instalada (CI):

Tempo ciclo (TC):

$$TC = 6,40$$

Tempo disponível por dia menos as concessões (TPC): 1335 minutos

Capacidade instalada a 100% de eficiência:

$$CI = \frac{TPC}{TC}$$

$$CI = \frac{1335}{6,4}$$

$$CI = 208 \text{ peças}$$

Capacidade instalada com o OEE de 75%, extraído do sistema de gerenciamento de eficiência da linha.

$$CI = \frac{TPC}{TC} * E$$

$$CI = 208 * 0,75$$

$$CI = 156 \text{ peças}$$

- Disponibilidade de equipamento:

Para determinar a disponibilidade das máquinas foi utilizado o método de Tempo Médio Entre Falhas (TMEF ou MTBF) e Tempo Médio para Reparo (TMPR ou MTTR), os quais são calculados conforme a seguinte formulação:

$$MTTR = \frac{\sum P_i}{N_f} \text{ e } MTBF = \frac{\sum P_f}{N_f}$$

Onde,

Nf = Número de falhas ou número de ocorrências informadas.

Pi = Período de interrupções que afetaram o serviço.

Pf = Período de funcionamento do serviço.

Os valores foram obtidos através dos apontamentos do sistema SAP da empresa, onde para cada parada é aberta uma nota de avaria no sistema e automaticamente é gerado o MTBF e MTTR das máquinas, como pode ser observado na Figura 24.

Classe de objetos	Par. efet.	MnTmToRepair	MnTmBetRepair
Total	21	1,527 H	476,592 H
	21	1,527 H	476,592 H

Figura 24: Tela do SAP do MTTR e MTBF da máquina 683

A partir dessa pesquisa no SAP foi criada a Tabela 8 que indica os valores de MTBF e MTTR para as várias máquinas que constituem o modelo e colocado os dados no programa de simulação

Tabela 8: Tabela de dados MTBF e MTTR

Quebra de Máquina em Horas				Quebra de Máquina em Horas			
Período	fev/2010 a fev/2011			Período	fev/2010 a fev/2011		
Máq.	Operação	MTBF	MTTR	Máq.	Operação	MTBF	MTTR
708	10	149.00	1.65	448	140	419.20	4.43
582	15	116.60	2.95	700070	150	2329.36	1.37
435	20	35.82	4.44	445	160	103.51	1.55
148	30	364.12	1.86	446	170	169.78	2.21
683	35	476.59	1.52	447	180	116.31	2.05
437	40	59.92	2.52	449	190	124.51	1.77
84	50	108.84	3.13	142	200	173.76	2.03
438	60	113.20	1.92	580	210	149.12	2.04
332	70	91.68	2.61	571	212	103.83	2.28
439	80	230.78	1.70	581	213	83.08	2.27
440	90	108.57	1.97	470	230	146.30	2.15
441	100	182.44	1.26	M266	260	608.06	0.79
172	110	265.04	2.36	M603	280	5575.69	1.39
504	120	379.45	2.30	609	290	596.40	2.11
473	130	543.13	2.15	2012	300	581.24	1.32
450	135	96.03	2.18				
457	135	95.68	2.48				
585	136	104.62	2.86				

Para a análise do impacto da quebra de equipamento na linha foram selecionadas as duas máquinas gargalos 172 e 447 e os três equipamentos que possui o menor MTBF, 435, 437 e 581.

- Tipos de paradas da linha;

As definições dos tipos de parada são determinadas pela área de sistema de manufatura para manter um padrão de preenchimento do diário de bordo pelo operador.

Existem alguns tipos de parada que são consideradas previstas e estão descontadas do tempo disponível, apresentada no item Turno de trabalho, que são: refeição, ginástica laboral, limpeza de máquina, lanche, verificação de torquímetro, manutenção planejada e reunião do dia da qualidade.

As paradas consideradas foram:

- Quebra de equipamento, explicada no item disponibilidade de equipamento.
- Troca de ferramenta.

A modelagem da operação de troca de ferramenta considerada foi para as máquinas 172 e 447 por serem os gargalos da linha e a máquina 437 por possuir o maior tempo de troca de ferramenta da linha.

A troca de ferramenta ocorre conforme a vida útil da ferramenta, indicada na Tabela 9.

Tabela 9: Vida Útil de ferramenta em peças produzidas

Vida útil de ferramenta			
Máq.	Operação	F01	F02
437	40	5000	2800
172	110	80	
447	180	200	

O tempo de troca de ferramenta para a máquina 437, foi determinado por coleta no diário de bordo conforme Tabela 10, pois a mesma não possui o sistema automático de controle eficiência.

Tabela 10: Tempo de troca de ferramenta máquina 437 em minutos

Tempo de troca de ferramenta (minutos)					
Máq.	Operação	F01		F02	
437	40	120	± 20	60	± 15

Para as máquinas 172 e 447, o tempo de troca de ferramenta foi extraído do sistema de controle de eficiência, explicado anteriormente. O sistema de controle de eficiência é instalado no CLP da máquina, ao ocorrer à parada, o mesmo coleta a parada automaticamente e operador precisa indicar em um painel o tipo de parada, gerando um banco de dados com informações

suficientes para completar o modelo. A amostragem do tempo de parada por troca de ferramenta foi extraída do sistema de abril de 2010 a fevereiro de 2011, exportadas para uma planilha e inseridas no software estatístico do programa de simulação *Automod*, chamado *ExpertFit*, onde foram realizadas todas as análises estatísticas necessárias, as quais são representadas na sequência deste texto.

- Tempo de Troca de Ferramenta máquina 172:

1. Estatística descritiva:

A Tabela 11, indica a estatística descritiva da amostragem dos tempos de parada em minutos, importante para entender o comportamento da amostragem.

Tabela 11: Estatística descritiva da máquina 172

Sample Characteristic	Value
Observation type	Real valued
Number of observations	466
Minimum observation	7
Maximum observation	29.730
Average	12.815
95.0% c.i. half-length	0.432
Median	11.600
Variance	22.499
Coefficient of variation	0.370
Skewness	1.109
Kurtosis	3.872

2. Histograma

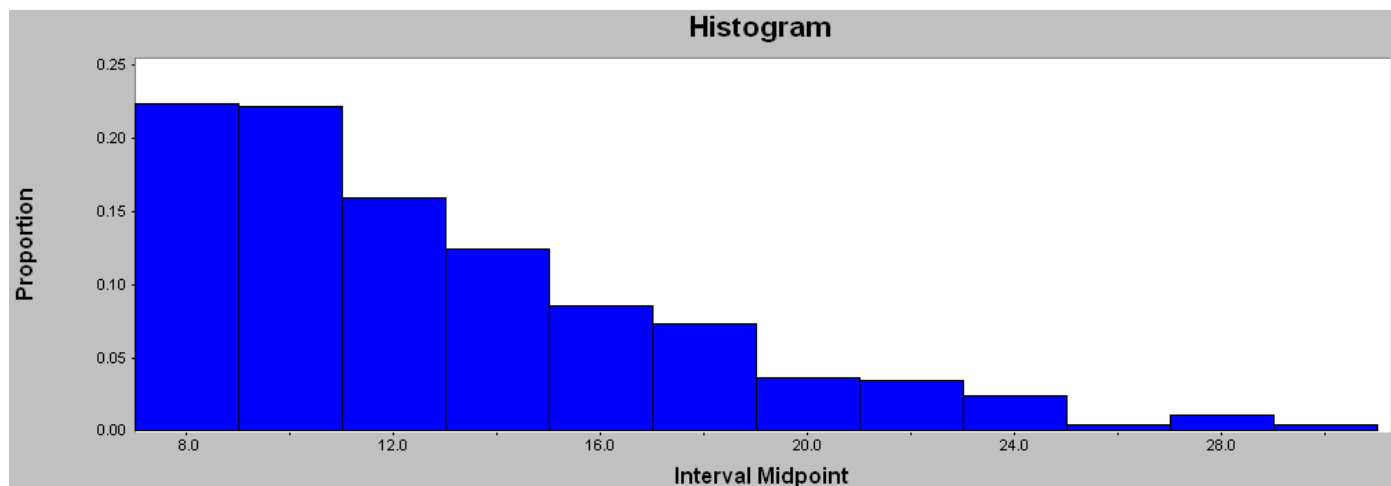


Figura 25: Histograma do Tempo de Troca de Ferramenta da Máquina 172

3. Teste de aderência

Tabela 12: Rank das distribuições estatísticas para troca de ferramenta na máquina 172

Model	Score	Rank
1 - Weibull(E)	97.41	1
2 - Johnson SB	96.55	2
3 - Inverted Weibull	90.52	3
4 - Gamma(E)	87.93	4
5 - Pearson Type 5	87.07	5
6 - Inverse Gaussian	77.59	6
7 - Lognormal	75	7
8 - Log-Logistic	73.28	8
9 - Random Walk	70.69	9½
10 - Extreme Value B	70.69	9½
11 - Erlang(E)	68.97	11½
12 - Exponential(E)	68.97	11½
13 - Log-Laplace(E)	58.62	13
14 - Erlang	55.17	14
15 - Gamma	53.45	15
16 - Log-Logistic(E)	50.86	16
17 - Log-Laplace	46.55	17
18 - Weibull	39.66	18
19 - Pareto(E)	37.07	19
20 - Lognormal(E)	32.76	20

Model	Anderson-Darling Test		Kolmogorov-Smirnov Test		Equal-Probable Chi-Square Test	
	Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank
1 - Weibull(E)	1.49276	2	0.04167	2	46.27468	1
2 - Johnson SB	0.48635	1	0.03476	1	52.11159	2
3 - Inverted Weibull	1.89970	3	0.04602	3	82.32618	3

Figura 26: Teste de aderência (KS / AD / χ^2) máquina 172

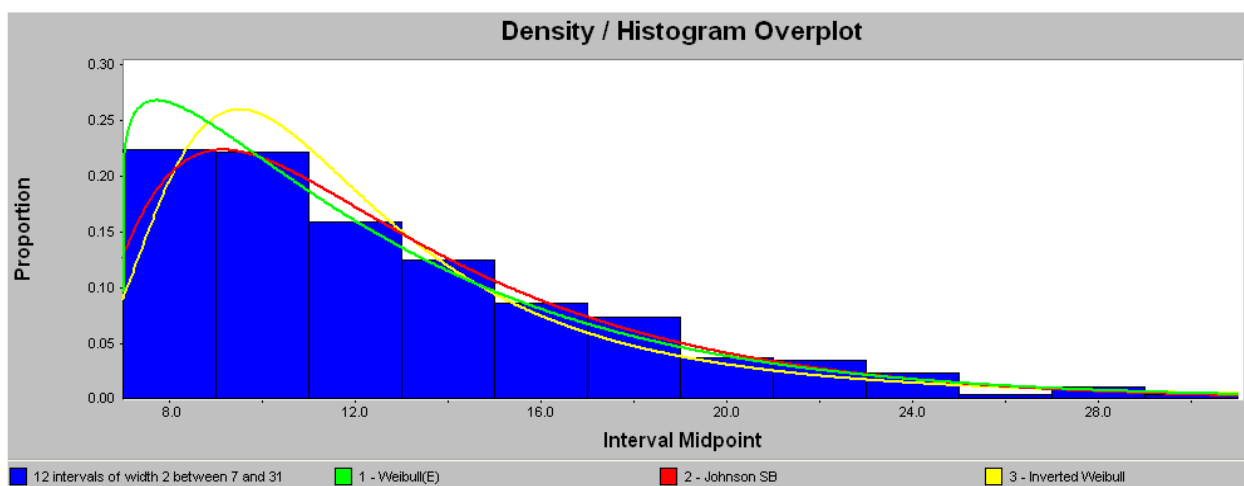


Figura 27: Comparação das distribuições estatísticas com histograma do Tempo de Troca de Ferramenta na máquina 172

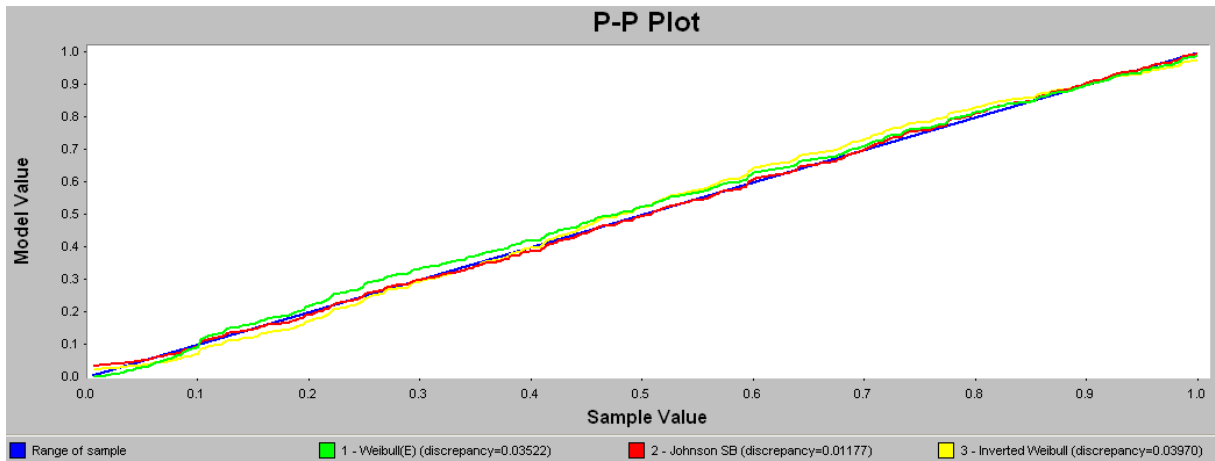


Figura 28: Comparação das distribuições estatísticas através do gráfico PPN - Máquina 172

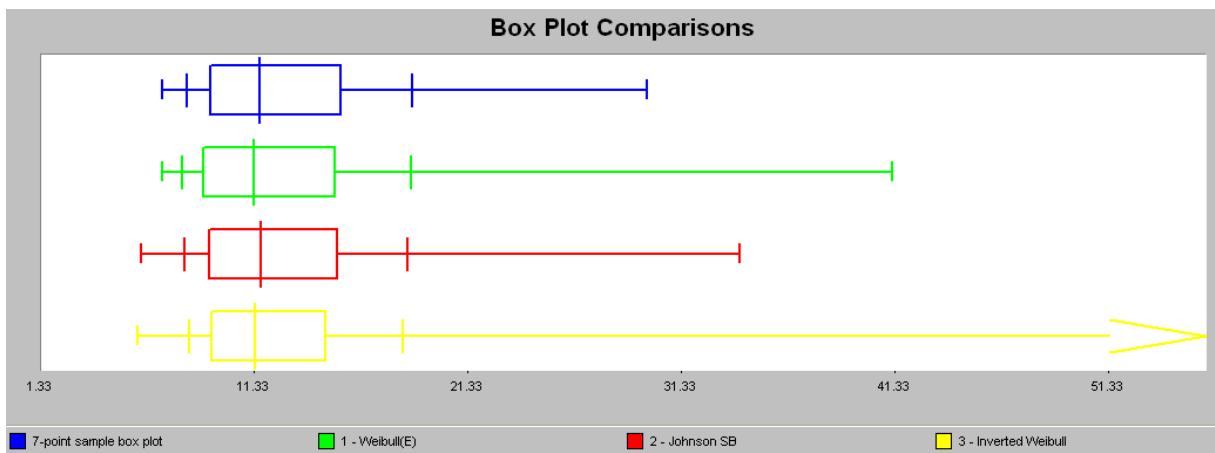


Figura 29: Comparação das distribuições estatísticas através Box Plot - Máquina 172

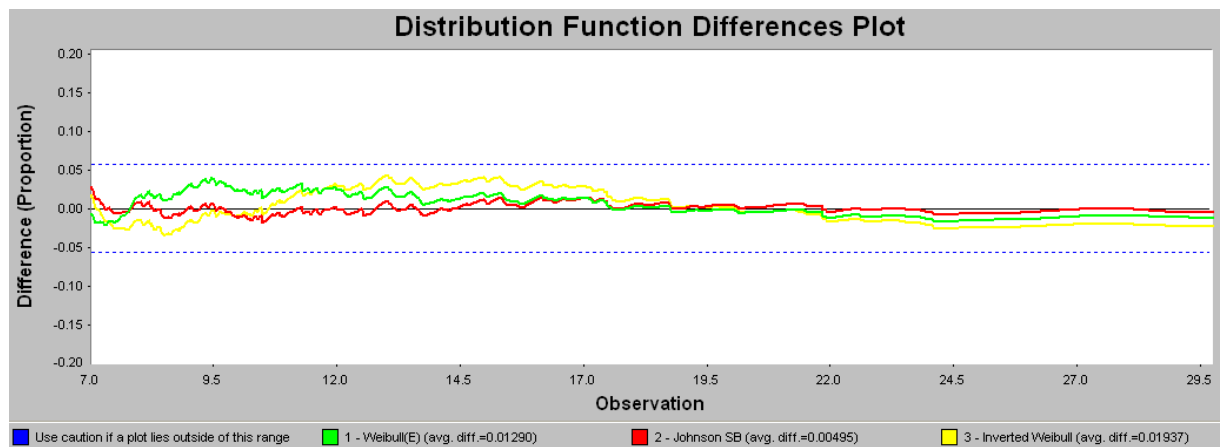


Figura 30: Comparação das distribuições estatísticas através do gráfico de diferença das curvas estatísticas máquina 172

Apesar de o *rank* das distribuições estatísticas apresentarem a curva Weibull (E) em primeira colocação de escolha, esta não representa a melhor opção, pois ao analisar o teste de aderência com KS, AD e χ^2 , o gráfico de comparação do histograma com as curvas, gráfico PPN, gráfico Box plot e o gráfico das diferenças das curvas estatísticas, a curva Johnson SB mostrou-se mais adequada para a aplicação. Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(x) = \frac{\delta}{\lambda z(1-z)\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\gamma + \delta \ln\left(\frac{z}{1-z}\right)\right]^2\right\} \text{ onde } z = \frac{x-\xi}{\lambda}, x > 0$$

Sendo que γ e δ são os parâmetros de forma do modelo, λ o parâmetro de escala e ξ o parâmetro de localização.

4. Gerar equação da distribuição correspondente no formato *Automod*

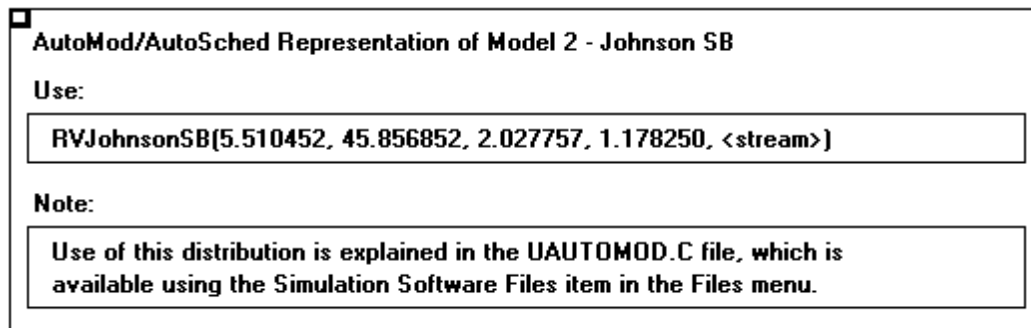


Figura 31: Representação da distribuição estatísticas na linguagem *Automod* máquina 172

Tempo de Troca de Ferramenta máquina 447:

1. Estatística descritiva

A Tabela 13, indica a estatística descritiva da amostragem dos tempos de parada em minutos, importante para entender o comportamento da amostragem.

Tabela 13: Estatística descritiva do Tempo de Troca de Ferramenta da máquina 447

Sample Characteristic	Value
Observation type	Real valued
Number of observations	274
Minimum observation	25.020
Maximum observation	74.920
Average	36.949
90.0% c.i. half-length	1.080
Median	33.260
Variance	117.238
Coefficient of variation	0.293
Skewness	1.250
Kurtosis	4.049

2. Histograma

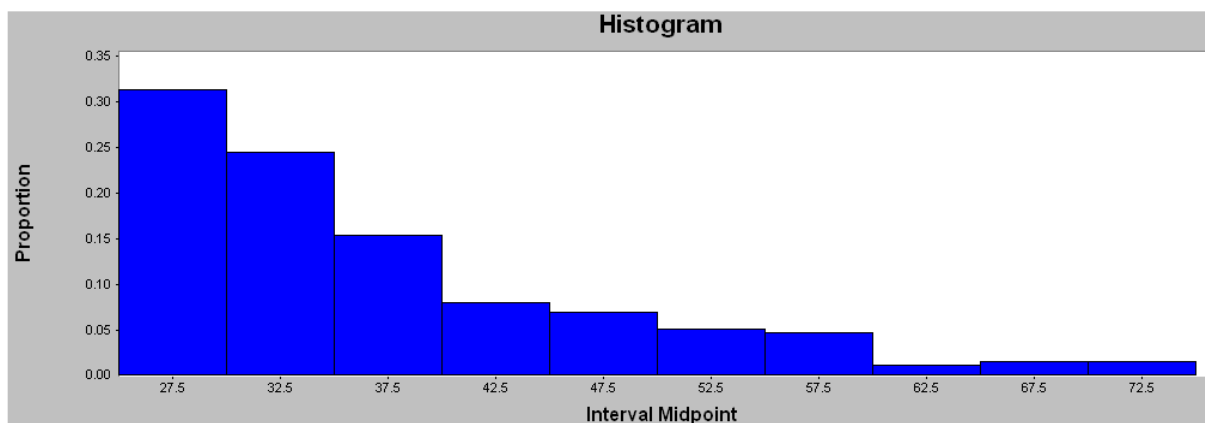


Figura 32: Histograma do Tempo de Troca de Ferramenta Máquina 447

3. Teste de aderência

Tabela 14: Rank das distribuições estatísticas para troca da ferramenta da máquina 447

Model	Score	Rank
1 - Weibull(E)	100	1
2 - Gamma(E)	95.83	2
3 - Erlang(E)	89.58	3½
4 - Exponential(E)	89.58	3½
5 - Johnson SB	83.33	5
6 - Inverted Weibull	78.13	6
7 - Pareto(E)	71.88	7
8 - Pearson Type 5	67.71	8
9 - Extreme Value B	66.67	9
10 - Lognormal(E)	61.46	10
11 - Log-Logistic	59.38	11
12 - Lognormal	53.13	12
13 - Inverse Gaussian	50	13
14 - Random Walk	44.79	14
15 - Erlang	38.54	15
16 - Gamma	36.46	17
17 - Log-Laplace	36.46	17
18 - Random Walk(E)	36.46	17
19 - Weibull	28.13	19
20 - Rayleigh(E)	18.75	20½

Model	Anderson-Darling Test		Kolmogorov-Smirnov Test		Equal-Probable Chi-Square Test	
	Statistic	Rank	Statistic	Rank	Statistic	Rank
1 - Weibull(E)	0.38366	1	0.02913	1	43.66423	3
2 - Gamma(E)	0.40117	2	0.03435	2	40.74453	1
3 - Erlang(E)	0.47485	3	0.04217	3	43.37226	2

Figura 33: Teste de aderência (KS / AD / χ^2) - Máquina 447

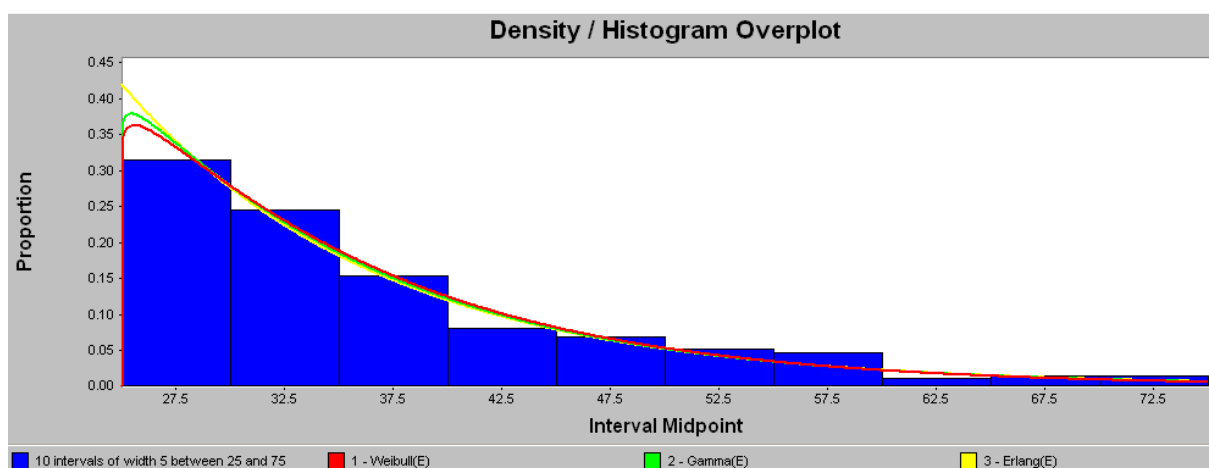


Figura 34: Comparação das distribuições estatísticas com histograma - Máquina 447

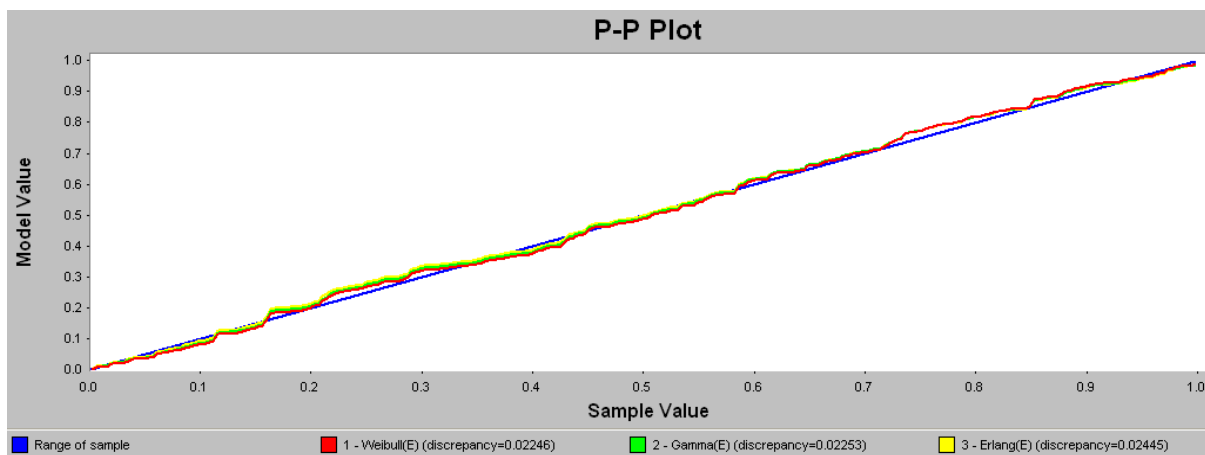


Figura 35: Comparação das distribuições estatísticas através do gráfico PPN - Máquina 447

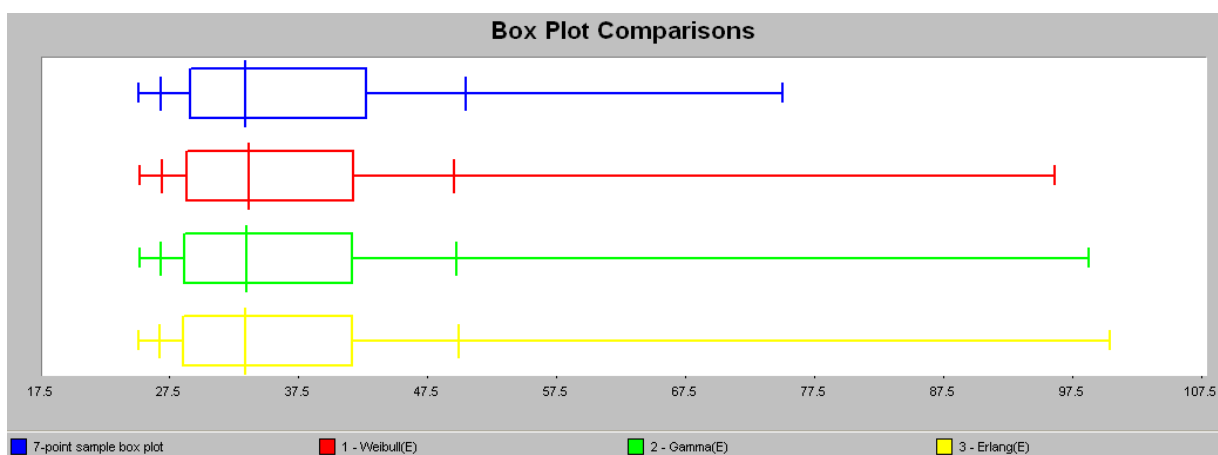


Figura 36: Comparação das distribuições estatísticas através Box Plot- Máquina 447

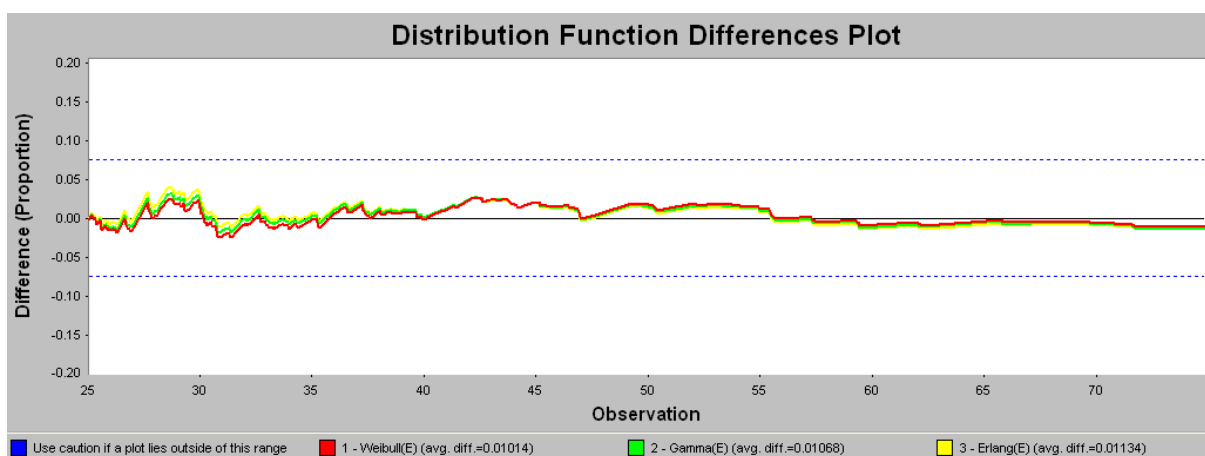


Figura 37: Comparação das distribuições estatísticas através do gráfico de diferença das curvas estatísticas máquina 447

Através da mesma análise aplicada para a máquina 172, foi determinada a distribuição estatística que melhor se aplica a máquina 447, sendo a curva Weibull (E). Sua função densidade de probabilidade é dada por:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta}}$$

Sendo que β é o parâmetro de forma do modelo e η é o parâmetro de escala.

4. Gerar equação da distribuição correspondente no formato Automod

□ **AutoMod/AutoSched Representation of Model 1 - Weibull(E)**

Use:

25.019546 + weibull 1.042130, 12.120388

Figura 38: Representação da distribuição estatísticas na linguagem *Automod* - Máquina 447

6.5. Construção do modelo computacional

O modelo computacional elaborado no software *Automod*, foi dividido em quatro partes. Essa divisão é feita para facilitar a implementação e verificação do modelo, ou seja, cria uma parte do modelo e roda para verificar se está correto e aderente a realidade. A primeira e a segunda parte são as operações de desbaste e a terceira e quarta parte são as operações de acabamento, como mostra a Figura 39.

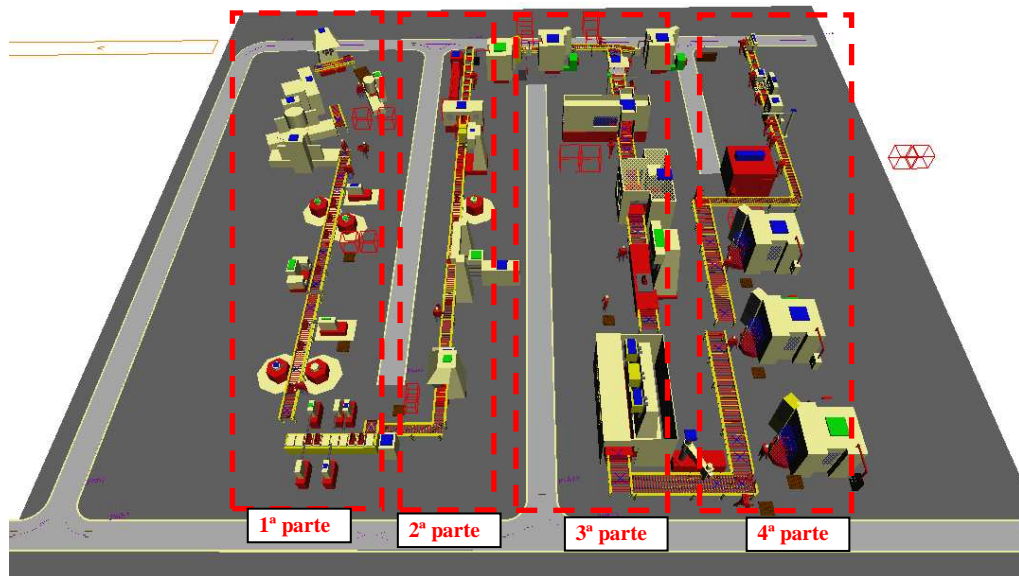


Figura 39: Layout da linha de usinagem A no software de simulação

Logo, no início também foi definida a nomenclatura para facilitar a programação, colocando no sufixo de cada elemento o significado da função:

- P_ - Processo
- Q_ - Fila
- L_ - Carga
- AL_ - Atributo da carga
- R_ - Recurso
- OL_ - Lista de ordem
- B_ - Bloqueio
- V_ - Variável
- C_ - Contador
- T_ - Tabelar

Após definição da nomenclatura, passou-se para a etapa de programação baseada no modelo conceitual onde foram definidas as variáveis, recursos, filas, cargas e outras informações básicas para o modelo. Na Figura 40 está um modelo de programação no *Automod*.

```

begin
  move into Agv:cp19
  travel to Agv:cp20
  set V_M437e = 0
  wait for 0.12 min /*limpar e carregar dispositivo, fixar peça e ligar maquina*/
  move into Conv:sta26
  if V_M084 = 0 and Q_EstM437 current loads > 0/* and V_M437e = 0*/ then
    order 1 load from OL_EstM437 to continue
  use R_M084 for 4.47 min /*usinar peças 4 e 6 cil*/
  wait until V_M084a = 0
  set V_M084a = 1
  move into Agv:cp20
  wait for 0.10 min /*soltar peça e descarregar dispositivo*/
  travel to Agv:cp21
  if AL_Setup = 1 and R_M084 total loads > 1 then
    wait for 10 min /*tempo de set_up de 4_6 cil. ou tempo de set_up de 6_4 cil.*/
  move into Conv:sta27
  set V_M084 = 0
  if V_SetupM438 = 1 and R_M438_2 total loads > 1 then
    wait to be ordered on OL_SetupM438
  wait until V_M438 = 0
  set V_M438 = 1
  move into Agv:cp22
  travel to Agv:cp23
  set V_M084a = 0
  wait until V_M438a = 1 or V_M438b = 1 or V_M438c = 1 or V_M438a = 0 and
V_M438b = 0 and V_M438c = 0
  set V_M438carga = 1
  wait for 0.10 min /*colocar peça na estação de carga M437*/
  move into Conv:sta28
  if AL_Setup = 1 and R_M438_2 total loads > 1 then
    set V_SetupM438 = 1
  set V_M438carga = 0
  set AL_TParcial = ac
  if V_M084 = 0 then
    order 1 load from OL_EstM437 to continue
  send to P_M438
end

```

Figura 40: Exemplo de programação no *Automod*

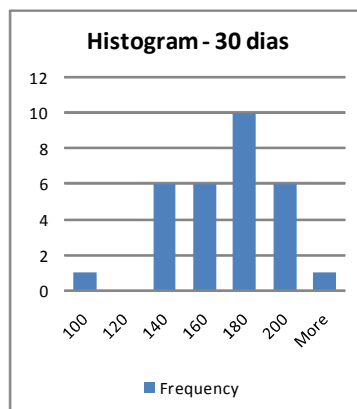
6.6. Validação e verificação do modelo

A validação e verificação do modelo, denominado de V&V, é uma das partes mais importantes na análise da simulação, pois nessa etapa verifica-se qual o nível de aderência à realidade. As maneiras utilizadas nesse trabalho foram:

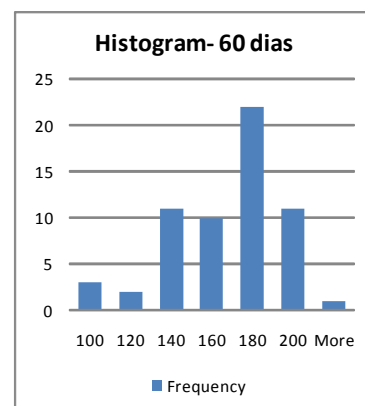
- Assistir a simulação para verificar a aderência a realidade;
- Comparar os resultados com dados da realidade;

Foi extraído do sistema SAP a produção diária dos últimos 380 dias, essa produção diária contempla todos os tipos de aplicação. Estratificou-se a amostra do final para o começo nos seguintes períodos 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 363 dias. Realizou-se a estatística descritiva e histograma das amostras dos períodos, o objetivo dessa atividade é avaliar o comportamento da produção em diferentes períodos para determinar o tempo de simulação.

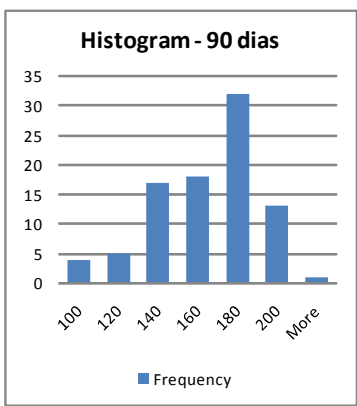
30 dias	
Mean	162
Standard Error	4.85
Median	162
Mode	177
Standard Deviation	26.583
Sample Variance	706.672
Kurtosis	1.233
Skewness	-0.7794
Range	127
Minimum	83
Maximum	210
Sum	4845
Count	30
Confidence Level(95.0%)	9.926



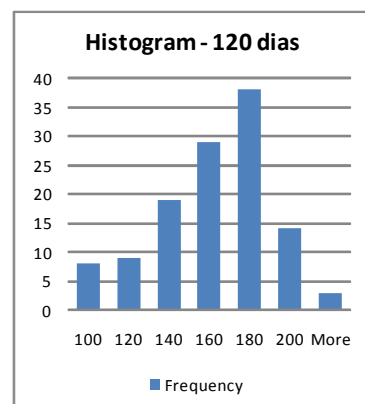
60 dias	
Mean	159
Standard Error	3.51
Median	163
Mode	177
Standard Deviation	27.216
Sample Variance	740.724
Kurtosis	0.171
Skewness	-0.7228
Range	127
Minimum	83
Maximum	210
Sum	9514
Count	60
Confidence Level(95.0%)	7.031



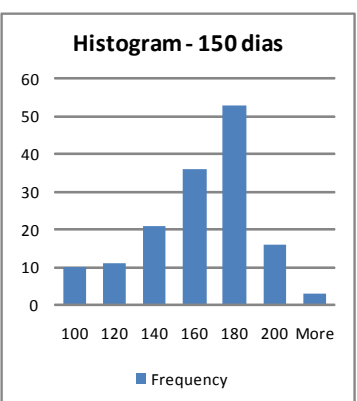
90 dias	
Mean	155
Standard Error	2.800
Median	161
Mode	177
Standard Deviation	26.559
Sample Variance	705.403
Kurtosis	-0.023
Skewness	-0.589
Range	127
Minimum	83
Maximum	210
Sum	13983
Count	90
Confidence Level(95.0%)	5.5628



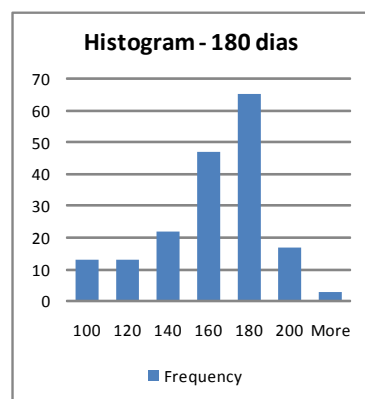
120 dias	
Mean	153
Standard Error	2.599
Median	156.5
Mode	176
Standard Deviation	28.474
Sample Variance	810.744
Kurtosis	-0.197
Skewness	-0.538
Range	130
Minimum	80
Maximum	210
Sum	18330
Count	120
Confidence Level(95.0%)	5.1468



150 dias	
Mean	153
Standard Error	2.278
Median	158.5
Mode	163
Standard Deviation	27.903
Sample Variance	778.563
Kurtosis	-0.103
Skewness	-0.646
Range	130
Minimum	80
Maximum	210
Sum	22954
Count	150
Confidence Level(95.0%)	4.5019



180 dias	
Mean	153
Standard Error	2.041
Median	158.5
Mode	161
Standard Deviation	27.378
Sample Variance	749.565
Kurtosis	-0.042
Skewness	-0.700
Range	130
Minimum	80
Maximum	210
Sum	27463
Count	180
Confidence Level(95.0%)	4.0268



363 dias	
Mean	151
Standard Error	1.370
Median	154
Mode	145
Standard Deviation	26.110
Sample Variance	681.752
Kurtosis	-0.041
Skewness	-0.549
Range	141
Minimum	80
Maximum	221
Sum	54889
Count	363
Confidence Level(95.0%)	2.695

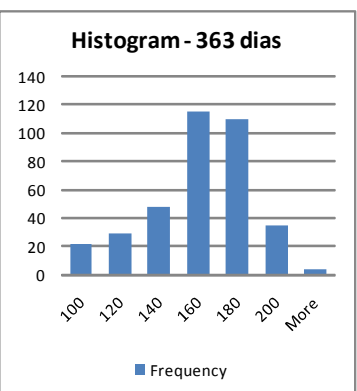


Figura 41: Estudo estatístico da produção diária para períodos de 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 363

Conforme mostra as Figuras 41, a produção mostrou-se uniforme, portanto foi definido rodar o modelo de simulação para V&V, em um período de 30 dias, sendo que cada dia possui 1335 minutos de tempo disponível por dia conforme apresentado anteriormente, resultando em 40050 minutos de simulação.

Após rodar a simulação da maneira explicada anteriormente. Obteve o resultado, conforme Figura 42.

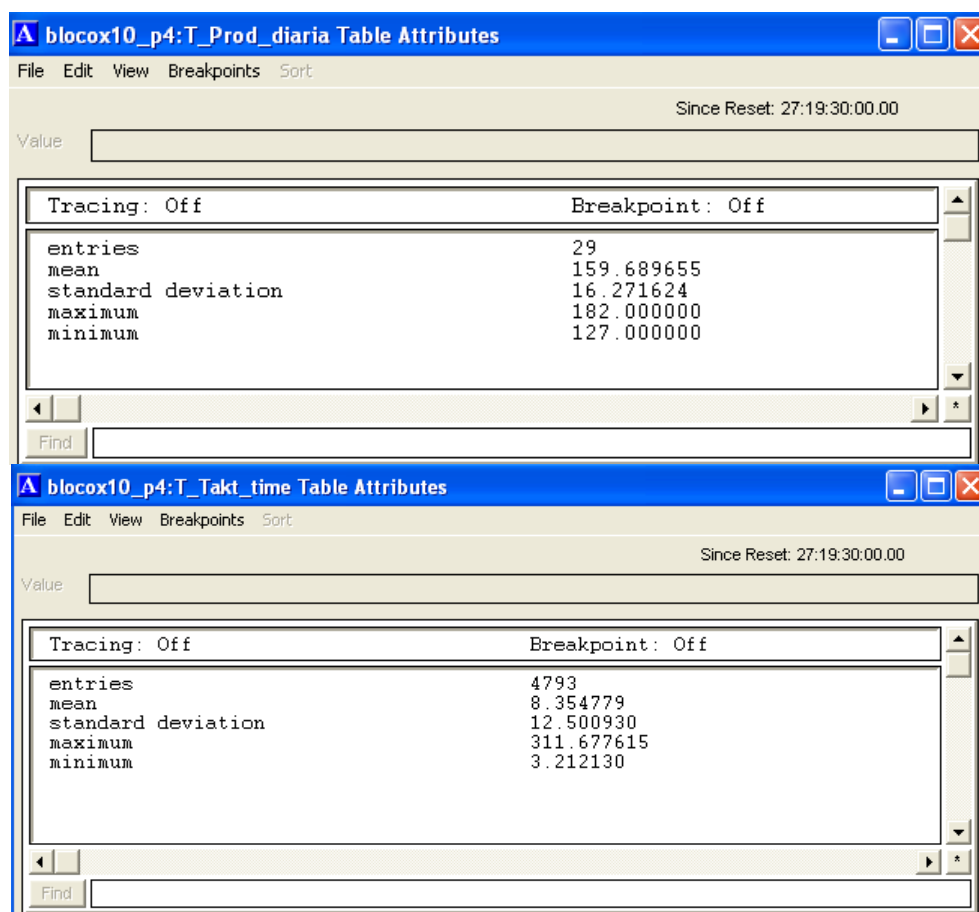


Figura 42: Resultado da simulação para validação do modelo

Na Tabela 15, é a comparação dos resultados da simulação apresentado na Figura 41 em relação aos valores reais, tendo como premissa um erro de 5%.

Tabela 15: Resultado da simulação para V&V

	Unidade	Modelo	Real	Erro (%)
Total de peças no período	peça	4793	4845	1%
Média da produção diária	peça	160	162	-1%
Takt-time real	minutos	8.35	8.27	1%

Os dados da Tabela 15 mostram que o modelo é representativo ao sistema real, pois os dados de saída ficaram dentro do erro máximo estabelecido de 5%.

- Acompanhar no *debugger* passo-a-passo a simulação;

Essa atividade caracteriza-se em realizar a simulação rode passo-a-passo e visualizar os eventos que estão ocorrendo e eventos futuros, também avaliando as variáveis do modelo, a Figura 43 mostra essa atividade.

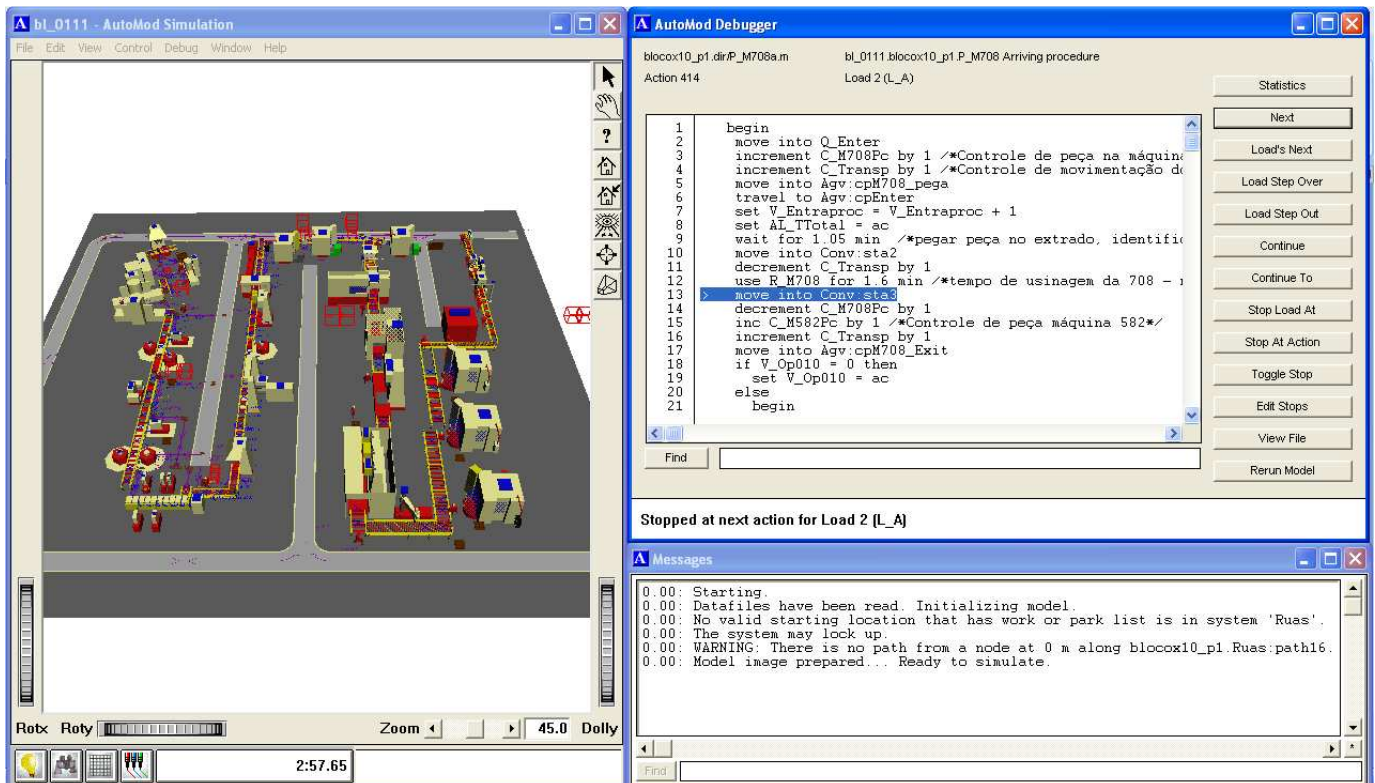


Figura 43: Tela de acompanhamento no debugger do Automod

7. RESULTADOS

Para atingir o aumento de capacidade 5%, equivalente a 170 peças produzidas por dia precisa-se melhorar a eficiência da linha, pois pelo histórico de produção é visível que essa capacidade pode ser atingida se os fatores de paradas não previsíveis sejam minimizados, como por exemplo, quebra de máquina, troca de ferramenta, falta de peça entre outras.

Através da simulação foi possível analisar os impactos reais devido à redução do tempo de ciclo de operação em algumas máquinas e às paradas não previsíveis, definidas anteriormente em parada por quebra de máquina e troca de ferramenta.

Os resultados apresentado abaixo foram obtidos a partir de uma rodada de simulação de 90 dias, equivalente há 120150 minutos para a parada do tipo troca de ferramenta, esse tempo é necessário para que ocorra uma quantidade mínima de troca e gerar dados suficientes para análise. Como redução do tempo de ciclo de operação e quebra de máquina ocorrem em uma frequência maior, não precisou de um tempo longo para as rodadas, sendo assim considerados 60 dias, equivalente há 80100 minutos.

Sendo que para garantir um intervalo de confiança, devem-se realizar no mínimo três a cinco replicas (BANKS, 2004). Deste modo para o modelo atual e os cenários propostos foram executadas cinco replicas, quantidade padrão mínima do programa *AutoStat*.

A simulação foi executada no programa *AutoStat*, um programa estatístico do próprio software *Automod*, onde são parametrizados as condições da simulação (Figura 44) e o mesmo executa automaticamente todas as replicas e gera os resultados necessários conforme as análises criadas no mesmo. As análises criadas indicadas na Figura 45.

- *Single Scenario*, consiste na análise básica estatística, foi criado essa análise para coletar os dados do modelo atual;
- *Vary one factor*, consiste na análise de como o modelo se comporta quando é mudado o valor de um parâmetro, foi criado para analisar o comportamento do modelo quando alterado a vida útil de ferramenta e o MTBF e MTTR das máquinas;
- *Warm-up*, consiste em estimar a quantidade de tempo em que o modelo alcança o estado de estabilidade, utilizado normalmente para modelos que começam vazio e o sistema precisa ser preenchido antes que os resultados estatísticos possam ser

coletados. Foi criado para analisar a partir de qual momento o modelo passa de regime transitório para regime permanente.

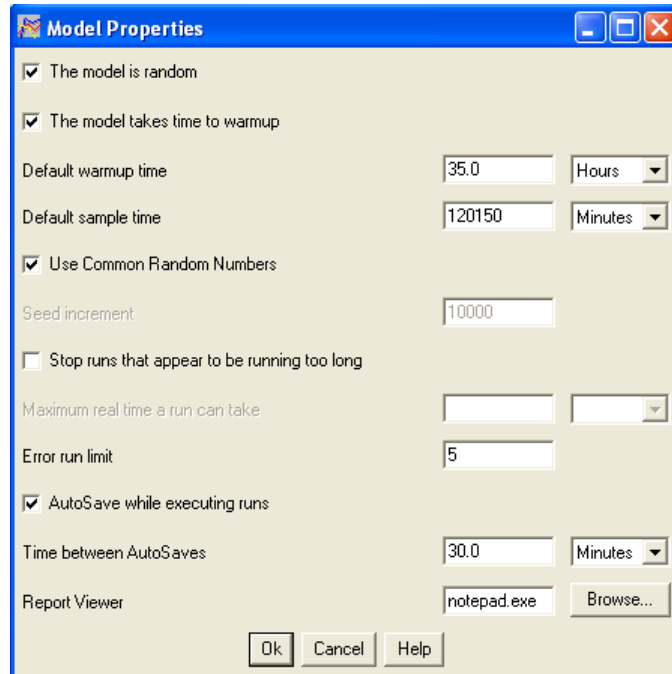


Figura 44: Parametrização das condições de simulação no software AutoStat

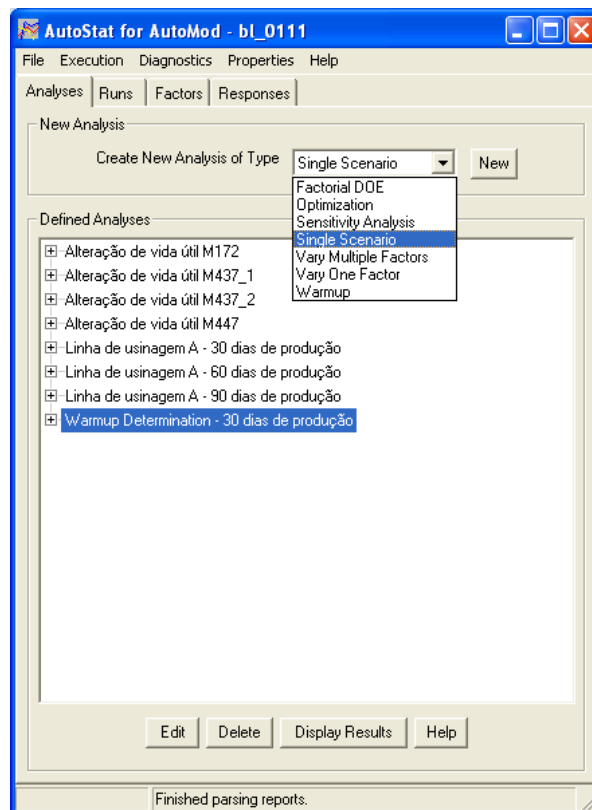


Figura 45: Tela de criação de análises no software AutoStat

Também foi criado no programa *AutoStat* as respostas que se deseja obter ao rodar o modelo de simulação, sendo indicadas na Figura 46:

- **Total produzido**, reflete toda a produção produzida no período de noventa dias;
- **Produção média diária**, consiste na produção média de um dia no período dos noventa dias simulado;
- **Tempo médio de produção por peça**, consiste no tempo médio de saída de peça no final da linha, ou seja, o *takt-time* real;
- **Tempo médio de atravessamento**, consiste no tempo médio em que a peça percorre a linha inteira da primeira à última operação.

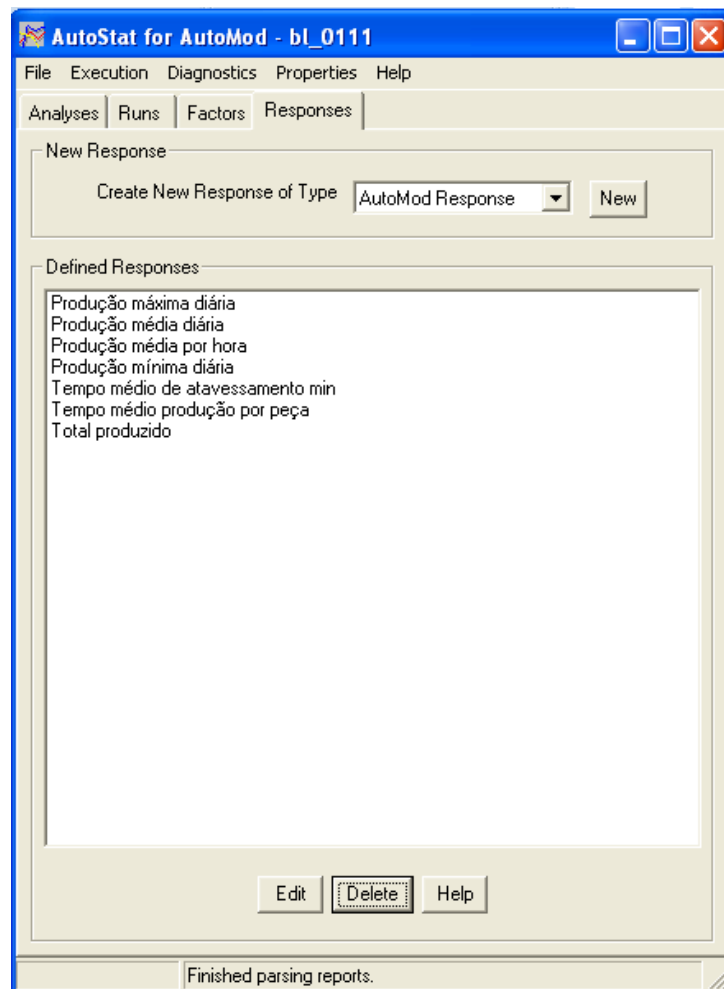


Figura 46: Tela de criação das respostas no software AutoStat

Após a definição das respostas e das análises do modelo, processou-se o modelo para determinar o *warm-up*.

O tempo de *warm-up*, esse tempo determina quando o modelo passa do regime transitório para o regime permanente, portanto foi rodada a simulação e observou-se através do gráfico de produção, Figura 47, quando o modelo se estabiliza, determinando um *warm-up* igual há 35 horas.

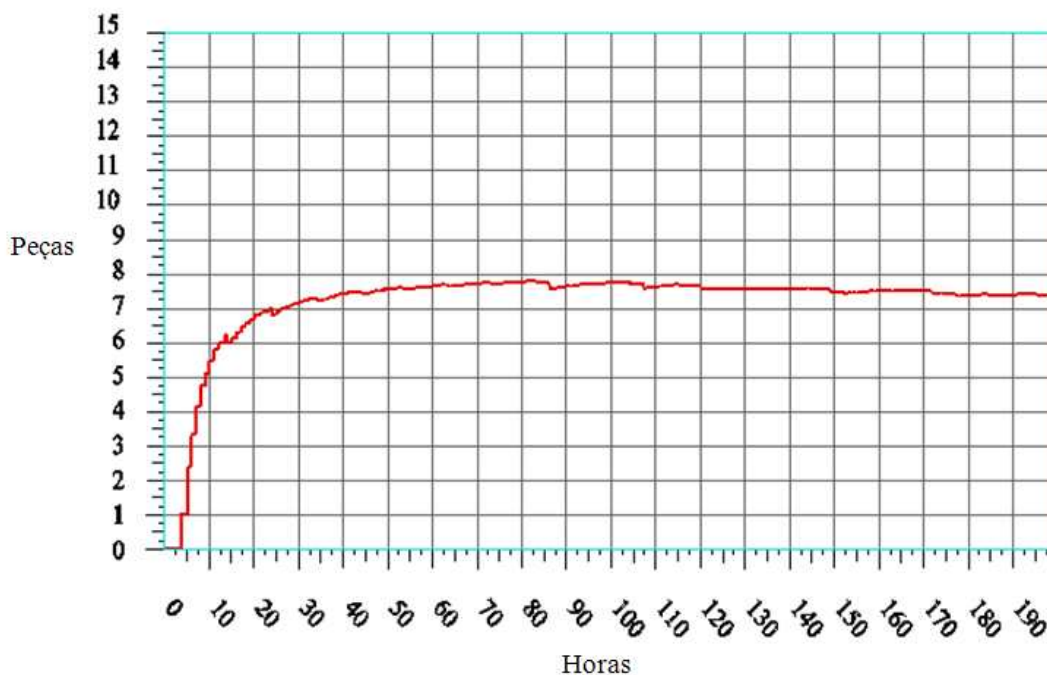


Figura 47: Gráfico de produção para determinar o warm-up

Vê-se que a curva do *warmup* estabiliza-se a partir de aproximadamente 35 horas de trabalho.

As respostas do modelo atual e das propostas foram comparadas, observando a oportunidade de algum ganho ou não, sendo os mesmos contabilizados em porcentagem, ou seja, a relação entre a condição atual e as propostas.

Resultado do modelo atual extraído do *AutoStat*, vê-se na Figura 48, onde para cada item apresentou-se, a média, desvio padrão, valor máximo e mínimo obtidos, mediana e número de réplicas.

Summary Statistics for Linha de usinagem A		
A	B	C
No factors changed		
Produção média diária	Average	163.0975
	Std. Dev.	0.1524682
	Minimum	162.8713
	Maximum	163.253
	Median	163.0991
	# of Runs	5
Tempo médio de atavessamento min	Average	706.0679
	Std. Dev.	4.742982
	Minimum	699.8183
	Maximum	711.0522
	Median	705.858
	# of Runs	5
Tempo médio produção por peça	Average	8.3039
	Std. Dev.	0.0037072
	Minimum	8.3005
	Maximum	8.3097
	Median	8.302
	# of Runs	5
Total produzido	Average	14469
	Std. Dev.	6.5192
	Minimum	14459
	Maximum	14475
	Median	14472
	# of Runs	5

Figura 48: Resultado da simulação modelo atual no software *AutoStat*

Após a obtenção dos resultados do modelo atual, avaliou-se individualmente a influência da variação da vida útil, sendo criadas doze propostas, aumentando em 10%, 20% e 30% a vida útil de cada ferramentas nas três máquinas identificadas anteriormente como as mais críticas, esses cenários estão ilustrados na Tabela 16 abaixo:

Tabela 16: Cenários da influência da variação de vida útil de ferramenta na produtividade

Cenários	Máquina 437 (1)	Máquina 437 (2)	Máquina 172	Máquina 447
Atual	5000	2800	50	80
Aumento de vida útil 10%	5500	3080	55	88
Aumento de vida útil 20%	6000	3360	60	96
Aumento de vida útil 30%	6500	3640	65	104

12 propostas

As Tabelas 17 a 18 apresentam os resultados das simulações considerando a variação da vida útil de ferramenta:

Tabela 17: Resultado da simulação para variação da vida útil da ferramenta da máquina 172

Proposta 1					
Máquina 172	Unidade	Vida Útil Atual 50 peças	Vida Útil Proposta 1 55 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14486	17	0.12%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.29	-0.01	-0.12%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.76	-0.01	-0.11%
Proposta 2					
Máquina 172	Unidade	Vida Útil Atual 50 peças	Vida Útil Proposta 2 60 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14486	17	0.12%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.29	-0.01	-0.12%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.76	-0.01	-0.11%
Proposta 3					
Máquina 172	Unidade	Vida Útil Atual 50 peças	Vida Útil Proposta 3 65 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14486	17	0.12%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.29	-0.01	-0.12%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.76	-0.01	-0.11%

Tabela 18: Resultado da simulação para variação da vida útil da ferramenta da máquina 447

Proposta 4					
Máquina 447	Unidade	Vida Útil Atual 80 peças	Vida Útil Proposta 4 88 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14495	26	0.18%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.28	-0.02	-0.24%
Tempo médio de atravessamento	horas	11.77	11.78	0.01	0.09%
Proposta 5					
Máquina 447	Unidade	Vida Útil Atual 80 peças	Vida Útil Proposta 5 96 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14495	26	0.18%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.28	-0.02	-0.24%
Tempo médio de atravessamento	horas	11.77	11.78	0.01	0.09%
Proposta 6					
Máquina 447	Unidade	Vida Útil Atual 80 peças	Vida Útil Proposta 6 104 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14495	26	0.18%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.28	-0.02	-0.24%
Tempo médio de atravessamento	horas	11.77	11.78	0.01	0.09%

Tabela 19: Resultado da simulação para variação da vida útil da ferramenta da máquina 437

Proposta 7					
Máquina 437 (1)	Unidade	Vida Útil Atual 5000 peças	Vida Útil Proposta 7 5500 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14468	-1	-0.01%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.3	0	0.00%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.83	0.06	0.52%
Proposta 8					
Máquina 437 (1)	Unidade	Vida Útil Atual 5000 peças	Vida Útil Proposta 8 6000 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14468	-1	-0.01%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.3	0	0.00%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.83	0.06	0.52%
Proposta 9					
Máquina 437 (1)	Unidade	Vida Útil Atual 5000 peças	Vida Útil Proposta 9 6500 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14468	-1	-0.01%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.3	0	0.00%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.83	0.06	0.52%
Proposta 10					
Máquina 437 (2)	Unidade	Vida Útil Atual 2800 peças	Vida Útil Proposta 10 3080 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14467	-2	-0.01%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.3	0	0.00%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.75	-0.02	-0.15%
Proposta 11					
Máquina 437 (2)	Unidade	Vida Útil Atual 2800 peças	Vida Útil Proposta 11 3360 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14467	-2	-0.01%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.3	0	0.00%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.75	-0.02	-0.15%
Proposta 12					
Máquina 437 (2)	Unidade	Vida Útil Atual 2800 peças	Vida Útil Proposta 12 3640 peças	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14467	-2	-0.01%
Produção média diária	peça	163	163	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.3	8.3	0	0.00%
Tempo de atravessamento	horas	11.77	11.75	-0.02	-0.15%

Vê-se, ao alterar a vida útil das ferramentas mais críticas, que não houve nenhum ganho na produção, sendo que houve apenas um pequeno aumento no total produzido das máquinas gargalo 172 e 447. Observa-se também que apenas houve um aumento do valor atual para o experimento de aumentar em 10%, para os experimentos de aumento em 20% e 30% o resultado estabilizou.

Executou-se uma simulação variando todas as vidas úteis das máquinas ao mesmo tempo, resultado mostrado na Tabela 20:

Tabela 20: Resultado da simulação para variação de todas as vidas úteis de ferramenta ao mesmo tempo

Dados Gerais	Unidade	Atual	Aumento de vida útil 10%	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14519	50	0.34%
Capacidade média diária	peça	163	164	1	0.61%
Tempo médio de produção	minuto	8.31	8.27	-0.04	-0.48%
Tempo de atravessamento	horas	11.80	11.52	-0.28	-2.46%
Dados Gerais	Unidade	Atual	Aumento de vida útil 20%	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14537	68	0.47%
Capacidade média diária	peça	163	164	1	0.61%
Tempo médio de produção	minuto	8.31	8.26	-0.05	-0.61%
Tempo de atravessamento	horas	11.80	11.35	-0.45	-3.93%
Dados Gerais	Unidade	Atual	Aumento de vida útil 30%	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14560	91	0.62%
Capacidade média diária	peça	163	165	2	1.21%
Tempo médio de produção	minuto	8.31	8.25	-0.06	-0.73%
Tempo de atravessamento	horas	11.80	11.34	-0.46	-4.09%

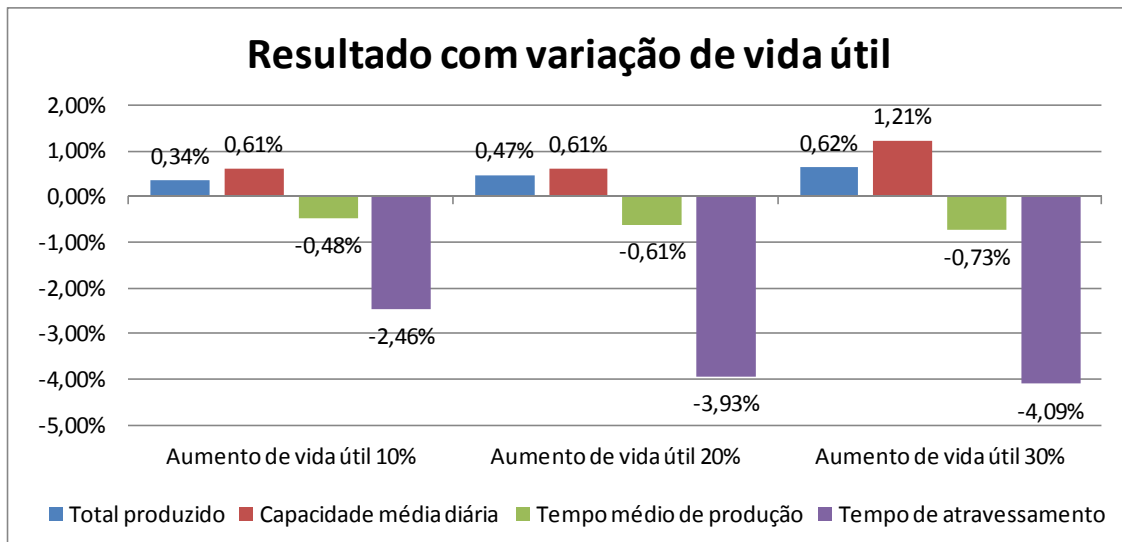


Figura 49: Resultado da simulação da variação de vida útil de todas as ferramentas ao mesmo tempo

Vê-se que, o resultado em alterar todas as vidas úteis das ferramentas ao mesmo tempo (Figura 49) foi um resultado melhor que o observado quando as variações foram feitas individualmente, porém ainda não significativo para disponibilizar mão-de-obra para essa atividade, pois para executar melhorias de vida útil de ferramenta há muito trabalho com fornecedor e teste de diferentes tipos de ferramenta, desprendendo de muito tempo e dinheiro para um resultado que não chegaria nem um pouco perto do objetivo de aumento de capacidade.

Então partiu para uma segunda experimentação realizando a variação dos dados de quebra das máquinas críticas e as duas máquinas gargalos. Variou-se o MTBF e o MTTR, sendo que o MTBF aumentou-se em 10%, 20% e 30% e o MTTR reduziu-se na mesma porcentagem, criando assim 15 propostas de variação, conforme Tabela 21. Nessa experimentação uma rodada de simulação de 60 dias, equivalente há 80100 minutos, com cinco replicações. Não há necessidade de rodar os 90 dias utilizados anteriormente, pois as máquinas escolhidas possuem um MTBF/MTTR muito menor que esse tempo, com isso se ganha tempo na coleta dos resultados.

Tabela 21: Cenários da influência da variação do MTBF/MTTR na produtividade

Cenários (horas)	435		437		172		447		581	
	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR	MTBF	MTTR
Atual	35.82	4.44	59.92	2.52	265.04	2.36	116.31	2.05	83.08	2.27
10% de variação	39.40	4.00	65.91	2.27	291.54	2.12	127.94	1.85	91.39	2.04
20% de variação	42.98	3.55	71.90	2.02	318.05	1.89	139.57	1.64	99.70	1.82
30% de variação	46.57	3.11	77.90	1.76	344.55	1.65	151.20	1.44	108.00	1.59

15 propostas

As Tabelas 22 a 26 apresentam os resultados das simulações para variação do MTBF/MTTR das máquinas:

Tabela 22: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 435

Máquina 435	Unidade	Atual	Proposta 1 ↑ 10% MTBF ↓ 10% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9640	49	0,51%
Produção média diária	peça	164	165	1	0,61%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,3	-0,04	-0,48%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	12,38	0,62	5,02%
Máquina 435	Unidade	Atual	Proposta 2 ↑ 20% MTBF ↓ 20% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9640	49	0,51%
Produção média diária	peça	164	165	1	0,61%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,3	-0,04	-0,48%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	12,85	1,09	8,49%
Máquina 435	Unidade	Atual	Proposta 3 ↑ 30% MTBF ↓ 30% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9712	121	1,25%
Produção média diária	peça	164	166	2	1,20%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,24	-0,1	-1,21%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	12,81	1,05	8,23%

Tabela 23: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 437

Máquina 437	Unidade	Atual	Proposta 4 ↑ 10% MTBF ↓ 10% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9643	52	0,54%
Produção média diária	peça	164	165	1	0,61%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,3	-0,04	-0,48%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	12,01	0,25	2,11%
Máquina 437	Unidade	Atual	Proposta 5 ↑ 20% MTBF ↓ 20% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9641	50	0,52%
Produção média diária	peça	164	166	2	1,20%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,3	-0,04	-0,48%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	12,17	0,41	3,37%
Máquina 437	Unidade	Atual	Proposta 6 ↑ 30% MTBF ↓ 30% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9641	50	0,52%
Produção média diária	peça	164	166	2	1,20%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,3	-0,04	-0,48%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	12,24	0,48	3,94%

Tabela 24: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 172

Máquina 172	Unidade	Atual	Proposta 7 ↑ 10% MTBF ↓ 10% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9563	-28	-0,29%
Produção média diária	peça	164	164	0	0,00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,37	0,03	0,36%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,80	0,04	0,35%
Máquina 172	Unidade	Atual	Proposta 8 ↑ 20% MTBF ↓ 20% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9565	-26	-0,27%
Produção média diária	peça	164	164	0	0,00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,36	0,02	0,24%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,84	0,08	0,70%
Máquina 172	Unidade	Atual	Proposta 9 ↑ 30% MTBF ↓ 30% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9592	1	0,01%
Produção média diária	peça	164	164	0	0,00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,34	0	0,00%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,77	0,01	0,10%

Tabela 25: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 447

Máquina 447	Unidade	Atual	Proposta 10 ↑ 10% MTBF ↓ 10% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9600	9	0,09%
Produção média diária	peça	164	164	0	0,00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,34	0	0,00%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,64	-0,12	-1,06%
Máquina 447	Unidade	Atual	Proposta 11 ↑ 20% MTBF ↓ 20% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9661	70	0,72%
Produção média diária	peça	164	164	0	0,00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,28	-0,06	-0,72%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,31	-0,45	-3,98%
Máquina 447	Unidade	Atual	Proposta 12 ↑ 30% MTBF ↓ 30% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9652	61	0,63%
Produção média diária	peça	164	164	0	0,00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,3	-0,04	-0,48%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,46	-0,30	-2,60%

Tabela 26: Resultado da simulação para variação do MTBF/MTTR da máquina 581

Máquina 581	Unidade	Atual	Proposta 13 ↑ 10% MTBF ↓ 10% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9624	33	0,34%
Produção média diária	peça	164	164	0	0,00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,31	-0,03	-0,36%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,53	-0,23	-1,97%
Máquina 581	Unidade	Atual	Proposta 14 ↑ 20% MTBF ↓ 20% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9649	58	0,60%
Produção média diária	peça	164	165	1	0,61%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,29	-0,05	-0,60%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,45	-0,31	-2,72%
Máquina 581	Unidade	Atual	Proposta 15 ↑ 30% MTBF ↓ 30% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9667	76	0,79%
Produção média diária	peça	164	165	1	0,61%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8,34	8,28	-0,06	-0,72%
Tempo de atravessamento	horas	11,76	11,38	-0,38	-3,37%

O resultado obtido em alterar o MTBF/MTTR não foi o que era esperado. Se observarmos os resultados das máquinas 435 e 437 houve um aumento no total produzido, porém o aumento do tempo de atravessamento foi muito maior. Isso ocorre devido às máquinas estarem localizadas no começo da linha, desta maneira disponibilizaram mais peças para a linha, porém a linha não consegue absorver essa quantidade de peça devido às outras restrições do sistema, ou seja, não saiu peça na mesma proporção que entrou, assim aumentando o estoque em processo e conseqüentemente o tempo de atravessamento.

Ao avaliar as máquinas 447 e 581 ocorre o inverso, como o posicionamento delas na linha são no final, elas aumentam o total produzido e reduz o tempo de atravessamento.

A máquina gargalo 172 teve um comportamento ainda mais interessante, pois o total produzido reduziu. Teoricamente ao aumentar a disponibilidade da máquina 172 deveria produzir mais. Porém a linha é tipo transfer, portanto a peça só avança quando há espaço a sua frente, como não tem como enviar as peças para próxima máquina seu tempo ocioso devido à quantidade de peça no fluxo aumenta, deixando de produzir.

Da mesma maneira que foi avaliado para a troca de ferramentas, foi feito com as paradas por quebra de máquina, variando o MTBF/MTTR de todas as máquinas relacionadas acima ao mesmo tempo, indicado na Tabela 27.

Tabela 27: Resultado da simulação para variação de todas as vidas úteis de ferramenta ao mesmo tempo

Dados Gerais	Unidade	Atual	Proposta 16 ↑ 10% MTBF ↓ 10% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14766	297	2,01%
Capacidade média diária	peça	163	167	4	2,40%
Tempo médio de produção	minuto	8,31	8,13	-0,18	-2,21%
Tempo de atravessamento	horas	11,80	11,64	-0,16	-1,40%
Dados Gerais	Unidade	Atual	Proposta 17 ↑ 20% MTBF ↓ 20% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	14469	14963	494	3,30%
Capacidade média diária	peça	163	169	6	3,55%
Tempo médio de produção	minuto	8,31	8,02	-0,29	-3,62%
Tempo de atravessamento	horas	11,80	12,08	0,284	2,35%
Dados Gerais	Unidade	Atual	Proposta 18 ↑ 30% MTBF ↓ 30% MTTR	Ganho	
Total produzido	peça	14469	15038	569	3,78%
Capacidade média diária	peça	163	170	7	4,12%
Tempo médio de produção	minuto	8,31	7,98	-0,33	-4,14%
Tempo de atravessamento	horas	11,80	12,43	0,634	5,10%

A Figura 50 apresenta os resultados graficamente, sendo bem melhor do que os resultados avaliando individualmente as variáveis. Isso ocorre, pois as restrições do sistema são minimizadas em conjunto, melhorando o fluxo da linha e dessa maneira aumentando a capacidade de produção, atingindo o resultado esperado de aproximadamente 5%.

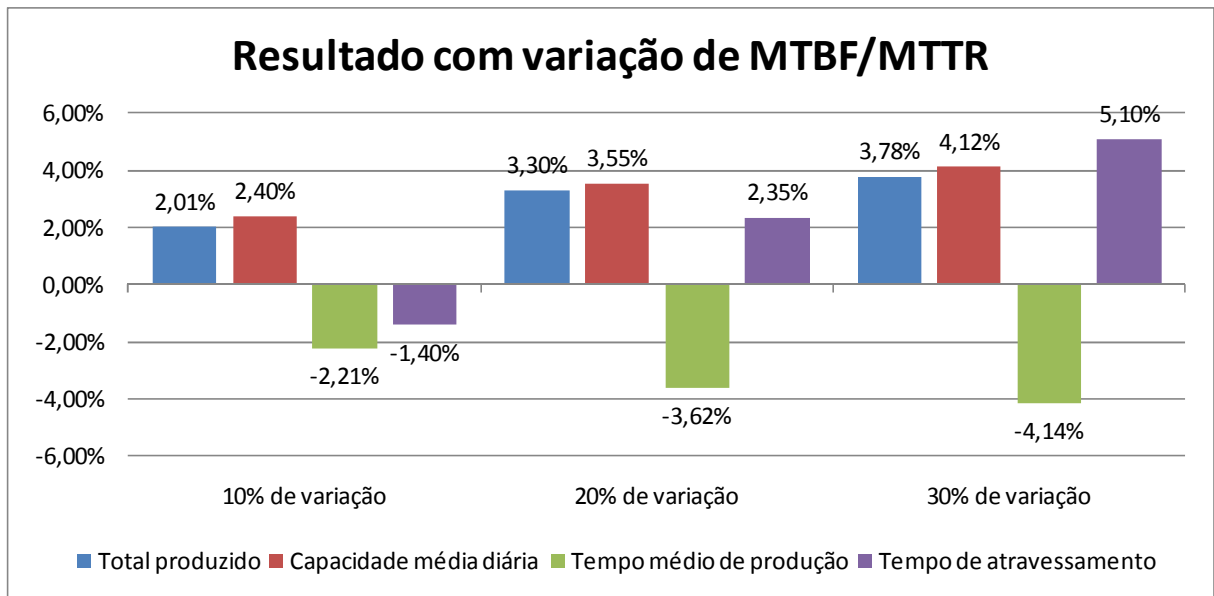


Figura 50: Resultado da simulação da variação de vida útil de todas as ferramentas ao mesmo tempo

Após realizar as experimentações para redução da parada de linha, realizou-se o experimento de redução do tempo de ciclo de operação através do conceito de máxima produtividade na usinagem. Essa análise foi baseada conforme citado anteriormente de um levantamento da área da produção, engenharia de processos e manutenção, gerando assim o seguinte cenário:

- Máquina 435, operação 20, realizar teste com nova ferramenta de corte, pois a máquina tem possibilidade de alteração de parâmetros de corte, podendo gerar uma redução de 01 minuto no tempo de ciclo;
- Máquina 438, operação 60, alterar programa da de usinagem para aumentar o avanço de aproximação da máquina a peça, podendo gerar uma redução de 40 segundos (0,67 minutos) no tempo de ciclo;
- Máquina 172, operação 110, realizar teste com nova ferramenta de corte, pois a máquina tem possibilidade de alteração de parâmetros de corte, podendo gerar uma redução de 1,5 minutos no tempo de ciclo;
- Realizar mudança de processo, transferindo operações da máquina 581 para as máquinas 571 e 580, gerando uma balanceamento das operações do final da linha.

Não foi possível, gerar mais pontos de melhoria em outras máquinas em relação aos dados de corte, pois as mesmas já estão saturadas em relação ao sistema máquina-ferramenta-peça-dispositivo de fixação das máquinas críticas e requisitos de qualidade do produto.

Com as sugestões acima gerou a propostas 19 tendo como resultado a Tabela 28.

Tabela 28: Resultado da simulação para variação do tempo de ciclo de operação

Proposta 19	Unidade	Atual	Variação TC	Ganho	
Total produzido	peça	9591	9811	220	2.24%
Produção média diária	peça	164	164	0	0.00%
Tempo médio de produção por peça	minuto	8.34	8.16	-0.18	-2.21%
Tempo de atravessamento	horas	11.76	12.93	1.17	9.04%

Ao observar os resultados da tabela 28, houve um aumento no total produzido, porém o aumento do tempo de atravessamento foi muito maior. Isso ocorre devido às intervenções do tempo de processo serem feitas nas máquinas localizadas no começo da linha, desta maneira disponibilizaram mais peças para a linha, porém a linha não consegue absorver essa quantidade de peça devido às outras restrições do sistema, ou seja, não saiu peça na mesma proporção que entrou, assim aumentando o estoque em processo e conseqüentemente o tempo de atravessamento. Esse fato também ocorreu ao alterar a disponibilidade de máquina do começo da linha.

8. CONCLUSÕES

8.1. Resultados obtidos

Esta metodologia de simulação mostrou que a capacidade da linha de produção nem sempre corresponderá ao gargalo da mesma. É necessário verificar qual é a capacidade que está efetivamente sendo aproveitada. Em todo processo há perdas e restrições, que acontecem em eventos distintos; caso as mesmas ocorram de forma exagerada ou acima do previsto, haverá a subutilização dos recursos e perdas de produção que poderiam ser evitadas. O fato de ocorrer em eventos diferentes, exige a necessidade da análise por simulação, pois eventos coincidentes, geram-se um cenário diferente do analisado estaticamente.

A análise de sensibilidade na variação dos valores de vida útil das ferramentas e do MTBF/MTTR das máquinas mostrou-se eficaz, pois se identificou que as mudanças pontuais na linha de usinagem A não surtam resultados expressivos em relação à capacidade produtiva. Ao melhorar um ponto, outro passa a ser a restrição.

Nas condições atuais desta linha, em relação aos recursos, vê-se que as vidas úteis dos equipamentos estão praticamente no final, como indicado na Figura 51. É necessária uma análise estratégica para renovação do maquinário. Não apenas visando a melhoria de disponibilidade da linha, mas também analisando os novos produtos que chegarão e terão tolerâncias mais apertadas.

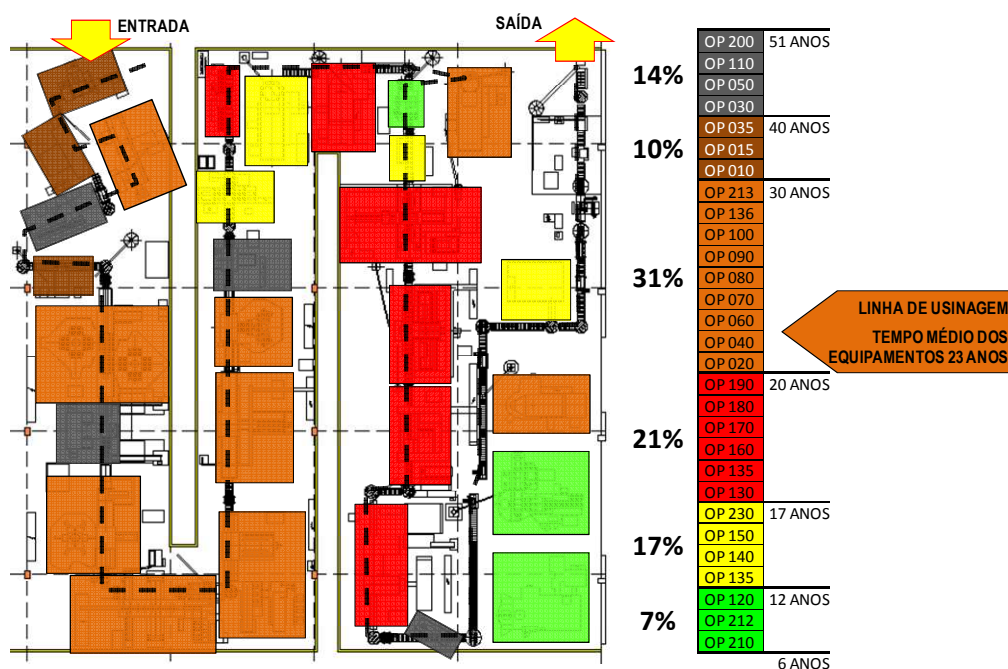


Figura 51: Tempo de vida dos equipamentos da linha de usinagem A.

Entretanto, antes de tomar qualquer decisão ainda possui algumas etapas que podem ser realizadas utilizando esse modelo de simulação, uma vez que nem todas as soluções de melhoria que possam contribuir para o aumento da produção foram esgotadas. Algumas sugestões estão citadas no item sugestões para trabalhos futuros

8.2. Sugestões para trabalhos futuros

Uma vez o modelo validado tem-se a possibilidade de executar novos experimentos, levando em consideração o potencial de melhoria, o autor propõe que sejam realizados novos estudos para buscar o aumento de capacidade da linha através de melhoria do sistema sem grandes investimentos, porém para os itens 1 e 2 abaixo citadas precisam de um banco de dados confiável.

1. Avaliar a influência das paradas de processo na capacidade de produção;
2. Avaliar a influência do sequenciamento de peça na capacidade de produção;
3. Avaliar a influência de pulmões de peças antes das máquinas críticas na capacidade de produção;
4. Determinar um sequenciamento de atividades de manutenção de equipamento visando melhorar a capacidade de produção, ou seja, qual máquina atuar primeiro.

8.3. Contribuições do trabalho

O fluxograma de trabalho proposto foi seguido e apresentou uma forma de trabalhar na definição da estratégia de negócio da empresa voltada para manufatura utilizando a ferramenta de simulação quando necessário. De uma forma organizada todas as áreas envolvidas seguem as etapas pré-estabelecidas, assim cada uma identifica sua responsabilidade para contribuir para o objetivo comum da corporação. Tendo assim uma intervenção de melhoria com começo, meio e fim, além do comprometimento de todos.

Nesse trabalho, foi abordada uma linha de produção já existente, porém o mesmo fluxograma pode ser utilizado para a concepção de um novo projeto. Tornando-se uma metodologia de trabalho, uma vez que, é de conhecimento de todos a importância para empresa que um projeto aconteça conforme planejado, pois os estudos de viabilidade econômica e até mesmo os compromissos de produção dependem deste acerto. A aplicação da simulação ainda na fase de planejamento do projeto auxilia na redução de graves erros de projeto e redução do custo de

implementação. Esta redução beneficia a empresa no momento da implantação do projeto reduzindo o tempo necessário para o bom e correto funcionamento da linha, eliminando assim os desperdícios de tempo com testes práticos que podem ser substituídos por análises ainda na fase de projeto através das ferramentas utilizadas neste estudo.

Foi detectado que para a simulação ser eficiente é necessário abordar os requisitos e as restrições dessa ferramenta. Muitos projetos não chegam ao final porque encontram barreiras nas técnicas apresentadas no Capítulo 5 e grandes paradigmas que devem ser quebrados. Um sistema de manufatura bem estruturado facilita muito o desenvolvimento do modelo, com relação à coleta dos dados, necessários para estruturação do projeto de simulação e validação, obtendo-se assim as respostas desejadas.

8.4. Considerações finais

Observou-se que a simulação de evento discreto aplicado na manufatura pode trazer grandes resultados, pois ao desenvolver um modelo é necessário descrever o processo detalhado que possibilite identificar os pontos fundamentais de melhoria. Além da interação de várias áreas, pode-se considerar em alguns casos que a simulação se comporta como um *Kaizen* virtual, com a vantagem de redução de risco na implementação e na possibilidade de avaliar propostas diferentes, respondendo as questões do tipo “o que ocorre se...”.

A ferramenta de simulação aplicada no estudo de caso mostrou-se eficaz, uma vez que muitos paradigmas da produção para justificar a incapacidade de atingir o volume de peça foram quebrados através da análise de sensibilidade. Além de detectar a ação das variáveis no sistema não tendo influência significativa no resultado de como as pessoas pensam de onde se conclui que as análises apenas analíticas não checam a interação de variáveis aleatórias, podendo checar as conclusões erradas, gastando tempo e dinheiro em pontos que não há necessidade.

Desta maneira o trabalho proposto atingiu as perspectivas, a manufatura está diretamente ligada a agregar valor ao produto, o ganho é rápido, sendo a ferramenta de simulação comparável ao *lean manufacturing* das décadas de 80 e 90. Para tanto, precisa-se de um esforço da comunidade à frente da pesquisa, onde a união empresa e academia (Universidades e Institutos de Pesquisas) são fundamentais, trabalhando juntas na capacitação de profissionais e na pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASKIN RONALD G. e STANDRIDGE CHARLES R. Modeling and Analysis of Manufacturing Systems - 1993.

BANKS J. e GIBSON R. R. Don't Simulate When: 10 rules for determining when simulation is not appropriate - [s.l.] : IEE Solutions, 1997.

BANKS JERRY Getting Started with AutoMod TM - Chelmsford, MA : Second Edition, 2004.

BANKS, JERRY; CARSON, JOHN S.; NELSON, BARRY L.; NICOL, DAVID M. Discrete-Event System Simulation- New Jersey : Englewood Cliffs,NJ, Prentice Hall., 2001. - Vol. 3th Edition.

BARTON RUSSEL R. Simulation Experiment Design // The 2010 Winter Simulation Conference. - Baltimore - Maryland : [s.n.], 2010.

BILLER BAHAR e GUNES CANAN Introduction to Simulation Input Modeling // The 2010 Winter Simulation Conference. - Baltimore - Maryland : [s.n.], 2010.

CARVALHO ANNA CRISTINA DIAS DE e PORTO ARTHUR JOSÉ VIEIRA ANÁLISE PARCIAL DA PESQUISA SOBRE SIMULAÇÃO // ENEGEP - Encontro Nacional de Engenharia de Produção. - 2001.

CHASE B. R., AQUILIANO J. N. e JACOBS. R. F. Administração da Produção para a Vantagem Competitiva - São Paulo : Bookman Companhia Editora, 2004.

CHWIF L. e MEDINA A. C., Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações - São Paulo : Editora Bravarte, 2006.

CHWIF L. Redução de modelos de simulação de eventos discretos na sua concepção: uma abordagem casual - São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica., 1999.

COLMANETTI MARCELO SILVEIRA Modelagem de sistemas de manufatura orientada pelo custeio das atividades e processos - São Carlos : Universidade de São Paulo - Escola de Engenharia de São Carlos, 2001.

DINIZ ANSELMO EDUARDO e FRANCISCO CARLOS MARCONDES NIVALDO LEMOS COPPINI Tecnologia da Usinagem dos Materiais - [s.l.] : Art Liber Editora, 2008. - Vol. 6ª Edição.

FRANCÊS CARLOS RENATO LISBOA Introdução às Redes de Petri. - Pará : Universidade Federal do Pará - UFPA, 2003.

GEORGES MARCOS RICARDO ROSA - Metodologia para Modelagem em Simulação de Sistemas: Aplicação em Manufatura Discreta - Campinas : Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2005.

GEORGES MARCOS RICARDO ROSA - Modelo de Gestão da Manufatura para Competição Global // SEGeT – Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. - 2007.

GEORGES MARCOS RICARDO ROSA - Uma Contribuição Sobre a Utilização de Sistemas de Informação na Formulação do Planejamento Estratégico nos Sistemas de Manufatura - Campinas : Universidade Estadual de Campinas - Faculdade de Engenharia Mecânica, 2001.

GOMES JEFFERSON OLIVEIRA Uma reflexão sobre os requisitos e as restrições para a fabricação de componentes automotivos // IV Workshop de Manufatura Automotiva . - São José dos Campos, SP : ITA, 2009.

HARREL CHARLES R., GHOSH BIMAN K. e BOWDEN ROYCE. Simulation Using ProModel® - [s.l.] : McGraw-Hill, 2000.

JURISHICA CARLEY Practical Advice for Organizations New to Simulation // The 2010 Winter Simulation Conference. - Baltimore - Maryland : [s.n.], 2010.

LAW AVERILL M. e KELTON W. DAVID Simulation modeling and analysis - New York : McGraw-Hill, 2000.

LAW AVERILL M. Statistical Analysis of Simulation Output Data: The Practical State of The Art // The 2010 Winter Simulation Conference. - Baltimore - Maryland : [s.n.], 2010.

LUCERO ADRIÁN GUILLERMO RICARDO Um método para desenvolvimento de medida de desempenho como apoio à gestão de sistemas de manufatura. - Florianópolis : Universidade Federal de Santa Catarina - 2006.

MELO MARCO BUZILES DE e RODRIGUES JOSÉ DE SOUZA Modelo estruturado para a implementação do Lean Production // Jornada Científica de Administração e Economia da UFMS. - Campo Grande : [s.n.], 2004.

MONTEVECHI JOSÉ A. B. [et al.] CONCEPTUAL MODELING IN SIMULATION PROJECTS BY MEAN ADAPTED IDEF: AN APPLICATION IN A BRAZILIAN TECH COMPANY // The 2010 Winter Simulation Conference. - Baltimore - Maryland : [s.n.], 2010.

OLIVEIRA CLÊNIO SENRA DE Aplicação de técnicas de simulação em projetos de manufatura enxuta // Estudos Tecnológicos - Vol. 4, n° 3: 204-217. - São Leopoldo - RS - Brasil : UNISINOS - Universidade do Vale do Rio dos Sinos, 2008.

PEGDEN C. DENNIS, SHANNON ROBERT E. e SADOWSKI RANDALL P. Introduction to Simulation Using Siman - New York : McGraw-Hill, 1995. - Vol. 2nd Ed.

PIDD MICHAEL Five Simple Principles of Modelling // The 1996 Winter Simulation Conference. - 1996.

PIDD MICHAEL Modelagem empresarial - Porto Alegre : Bookman, 1998.

PINTO JOÃO CARLOS e PIRES SÍLVIO R. I. Indicadores do Desempenho Competitivo na Gestão Estratégica da Manufatura // Encontro Nacional Engenharia de Produção - ENEGEP. - 1997.

PIRES S. Gestão estratégica da produção - Piracicaba : Unimep, 1995.

PIRES SILVIO ROBERTO IGNACIO, SANTOS FERNANDO CÉSAR ALMADA e GONÇALVES MARILSON ALVES - Prioridades Competitivas na Administração Estratégica da Manufatura: estudo de casos - São Paulo : RAE - Revista de Administração de Empresas, 1999. - Vols. Out/Dez - V.39 - nº4 - p 78-84.

PORTER M. E Estratégia competitiva: técnicas para análise de indústrias e da concorrência. 5. ed. - Rio de Janeiro: Campus : [s.n.], 1991.

PORTER M. E Vantagem competitiva: criando e sustentando um desempenho superior - Rio de Janeiro : Campus, 1990.

POWELL STEPHEN G. e BAKER KENNETH R. Management Science - The Art of Modelling with Spreadsheets - New Jersey : John Wiley & Sons, 2010. - Vol. 3rd ed.

ROBINSON STEWART Simulation: the practice of model development and use - Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2004.

SAAD S. M. The reconfiguration issues in manufacturing systems // Journal of Materials Processing Technology 138, pp 277-283. - 2003.

SARGENT ROBERT G. Verification and Validation of Simulation Models // The 2010 Winter Simulation Conference. - Baltimore - Maryland : [s.n.], 2010.

SILVA ANDRÉ KOIDE DA Método para avaliação e seleção de softwares de simulação de evento discretos aplicados à análise de sistemas logísticos. - São Paulo : Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - 2006.

SLACK N. Vantagem Competitiva em Manufatura - São Paulo : Atlas, 1993.

SLACK, N.; CHAMBERS, S.; HARLAND, C.; HARRISON, A.; JOHNSTON, R. Administração da produção - São Paulo : Atlas, 1997.

STURROCK DAVID T. Tips for Successful Practice of Simulation // The 2010 Winter Simulation Conference. - Baltimore - Maryland : [s.n.], 2010.

WHEELWRIGHT S. C. Manufacturing strategy: defining the missing link. Strategic Management Journal, v. 5, p.77-91 - 1984.

WHEELWRIGHT S.C. e HAYES R.H. Competing Through Manufacturing - [s.l.] : Harvard Business Review, 1985.